

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA  
ELECTRICA Y ELECTRONICA**

---

---

**PROGRAMA ACADÉMICO  
DE PERÍODO SABÁTICO 2-2016  
PERIODO 15 DE AGOSTO DEL 2016  
AL 14 DE AGOSTO DEL 2017**

**PROGRAMA**

**ELABORACIÓN DE MATERIAL DIDÁCTICO PARA LA  
ENSEÑANZA, BASADO EN EL MODELO EDUCATIVO  
VIGENTE.**

**LIBRO DE TEXTO: MEDICIONES ELECTRICAS**

**Informe Final**

- Unidad 1. Conceptos Básicos**
- Unidad 2. Instrumentos Básicos y Avanzados**
- Unidad 3. Medición de parámetros**
- Unidad 4. Instrumentos especiales y virtuales**
- Unidad 5. Diseño y elaboración de tarjetas de circuitos impresos.**

**PRESENTADO POR:  
ING. JESÚS ALFREDO ESPINOSA  
CALVO**

AGOSTO 2017

## Presentación.

Este es el **reporte final** del trabajo que se me responsabilizó desarrollar del programa de Periodo Sabático, **ELABORACIÓN DE MATERIAL DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA, BASADO EN EL MODELO EDUCATIVO VIGENTE. LIBRO DE TEXTO: MEDICIONES ELECTRICAS**. Aquí se presenta todos los contenidos del programa de la asignatura Mediciones Eléctricas, partiendo desde la introducción a los conceptos de metrología fundamentales, conceptos de electricidad, se estudian las fuentes de alimentación, multímetros analógicos y digitales, osciloscopios y generadores de señal, y medidores de impedancia, hasta la construcción de circuitos impresos. Aunque se cuidó con esmero el desarrollo del trabajo, no lo considero como un trabajo terminado exhaustivamente, sino que queda sujeto a modificaciones por sugerencias que la revisión técnica proponga.

Como se indica en el título autorizado por la dirigencia del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y de la Dirección General de Educación Superior Tecnológica, la elaboración de este documento constituye un libro que trata sobre los instrumentos básicos para medir fundamentalmente las magnitudes eléctricas comunes: voltaje, corriente, impedancia y frecuencia. Desde luego, el contenido se ha desarrollado para utilidad de aprendizaje de alumnos y de apoyo didáctico para los profesores de la asignatura de Mediciones Eléctricas de la carrera de ingeniería electrónica. Es necesario señalar que la ubicación de la materia en el plan de estudios está en segundo semestre.

Al solicitar la elaboración de este documento, lo hice tomando en cuenta mi experiencia al haber sido profesor de esta materia varias veces, lo cual me ha sido de mucho apoyo. Con esta base puedo afirmar que uno de los aspectos que más dificultad ofrece al trabajo académico correspondiente a la asignatura, es la carencia estudiantil de conocimientos fundamentales de electricidad. Esta limitación, consecuentemente provoca que el curso de mediciones eléctricas deba ser desarrollado con énfasis en la enseñanza de técnicas y de principios de funcionamiento de los instrumentos, sus posibilidades, limitaciones y aplicaciones. Esta metodología docente tiene como resultado un aprendizaje mecanizado de la medición eléctrica, puesto que se soslaya el conocimiento del fenómeno eléctrico, que se pretende medir,<sup>1</sup> se ignora cómo se ha venido construyendo la ciencia eléctrica, a la par de no señalar cómo se han derivado los diversos instrumentos para medirlo. Otros aspectos, no menos importantes, que no se consideran son el uso adecuado de sistemas de unidades internacionales, y las normas de seguridad.

Por lo dicho anteriormente, en las notas que aquí se reportan, se desea producir la metodología educativa que actualmente se indicada en el programa de estudios de la materia, y tienen la intención de coadyuvar a lograr cabalmente las competencias ahí señaladas. Se pretende que el alumno, de manera equilibrada (teoría-práctica) y reflexiva tome los conocimientos necesarios, que adquiera la capacidad de construir otros más, y aplicarlos de manera exitosa y productiva.

Los instrumentos que miden magnitudes eléctricas siguen el desarrollo de la ciencia en electrónica y su evolución tecnológica, por ello esta área se encuentra frente cambios muy rápidos, lo que lleva a los equipos de medición a su obsolescencia relativamente pronto. También, los cambios tecnológicos provocan cambios en la educación, lo que implica dirigir al alumno hacia la enseñanza de la investigación permanente que le permita actualizarse y conocer por sí mismo las innovaciones que están ocurriendo en los instrumentos de medición. Este libro pretende mostrar el funcionamiento elemental de los instrumentos eléctricos y electrónicos básicos, sugiere actividades de laboratorio considerando los aparatos disponibles en el laboratorio de la Institución, pero también muestra cómo usar software y emplear la instrumentación virtual, como tendencia actual de las herramientas de medición. Los datos que se ofrecen sobre instrumentos (especificaciones) sólo pretenden ser una guía, son el resultado de una búsqueda documental cuidadosa, pero deberán actualizarse para evitar quedarse rezagado en este mundo de evolución acelerada.

Atentamente.

Jesús Alfredo Espinosa Calvo

---

<sup>1</sup> Los alumnos de segundo semestre de la carrera de electrónica, la mayoría no tienen conocimientos básicos de electricidad.

## CONTENIDO DE LA UNIDAD I

UNIDAD 1.....	1
Conceptos Básicos .....	1
1.1 CONCEPTO DE MEDIDA. ....	1
1.1.1 Contar. Sus orígenes.....	1
1.1.2 Concepto de número.....	2
1.1.3 Medir y medida. ....	2
1.1.4 Incertidumbre en una medición.....	3
1.1.5 Calibración.....	3
1.1.6 La trazabilidad. ....	4
1.1.7 Repetibilidad de los resultados. ....	5
1.2 METROLOGIA.....	5
1.3 NORMAS OFICIALES EN MÉXICO. ....	6
1.4 ELEMENTOS DE LA MEDICION .....	7
1.4.1 Magnitudes físicas. ....	7
1.4.1.1 Tipos de magnitudes físicas:.....	8
1.4.1.1.1 Por su origen: .....	8
1.4.1.1.2 Por su naturaleza matemática, las magnitudes se clasifican en escalares y vectoriales:.....	9
1.4.1.1.3 Según su actividad, se clasifican en magnitudes extensivas e intensivas: .....	9
1.4.1.2 Relación entre magnitudes intensivas y extensivas. ....	10
1.4.2 Características de los instrumentos de medición.....	11
1.4.2.1 Exactitud, error y precisión.....	11
1.4.2.2 Fuentes de error.....	12
1.4.2.3 Rango.....	13
1.4.2.4 Alcance (span). ....	13
1.4.2.5 Fiabilidad. ....	14
1.4.2.6 Linealidad. ....	14
1.4.2.7 Sensibilidad.....	15
1.4.2.8 Resolución. ....	15
1.4.3 Los métodos de medida. ....	15
1.5 SISTEMAS DE UNIDADES Y PATRONES. ....	18
1.5.1 Orígenes del sistema métrico actual. ....	18
1.5.1.1 Gabriel Mouton (1670).....	18
1.5.1.2 La determinación de milla náutica. ....	19
1.5.1.3 El Sistema Métrico Decimal francés. (1799).....	19
1.5.1.4 Unidad de peso.....	22
1.5.1.5 El Sistema Internacional de unidades (SI).....	23
1.5.1.6 La Convención del Metro, 1875.....	23

1.5.1.7 Reuniones de la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) y sus decisiones más importantes...	25
1.5.2. Las unidades básicas.....	28
1.5.3 Definiciones de las unidades básicas.....	28
1.5.4 Unidades derivadas expresadas en función de unidades básicas. ....	30
1.5.5 Los múltiplos y submúltiplos de las unidades se forman mediante prefijos: .....	31
1.5.6 Algunas reglas de escritura de los nombres y símbolos de las unidades y prefijos. Expresión de los valores de las magnitudes.....	32
1.5.7 Sistema CGS Gaussiano. ....	36
1.5.8 El sistema práctico o QES. ....	38
1.5.9 El sistema MTS.....	39
1.5.10 El sistema MKS absoluto o Giorgi. ....	39
1.5.11 El sistema técnico o terrestre.....	40
1.5.12 Sistema de unidades inglés, imperial, anglosajón o FPS (por foot, poundal, second). ....	41
1.6 TIPOS DE CORRIENTE ELÉCTRICA.....	43
1.6.1 Fundamentos de electricidad. ....	43
1.6.1.1 Concepto de polaridad y carga eléctrica. ....	44
1.6.1.2 Electricidad Estática (Electrostática). ....	45
1.6.1.2.1 Separación de cargas por fricción o contacto. ....	46
1.6.1.2.2 Separación de cargas inducida por la presión .....	46
1.6.1.2.3 Separación de cargas inducida por la temperatura.....	46
1.6.1.2.4 Descarga electrostática. ....	47
1.6.2 El concepto de Fuerza. ....	48
1.6.2.1 Definición de la unidad de fuerza. ....	48
1.6.2.2 Fuerzas por contacto. ....	48
1.6.2.3 Fuerzas a distancia. ....	49
1.6.3 La ley de Coulomb. ....	50
1.6.3 La unidad de carga eléctrica. ....	51
1.6.3 Carga eléctrica del electrón.....	51
1.6.4 El concepto de campo. ....	52
1.6.4 El campo eléctrico. ....	52
Representación gráfica del campo eléctrico .....	53
Trabajo mecánico y trabajo fisiológico.....	54
1.6.5 Concepto de Trabajo mecánico ( $W$ , por “work” en inglés). ....	54
1.6.6 Energía.....	55
1.6.6 Cálculo de la energía cinética .....	56
1.6.6 Cálculo de la Energía potencial.....	56
1.6.6 Energía potencial eléctrica. ....	57
Un caso particular.....	58
1.6.7 Diferencia de Potencial eléctrico de un campo (Voltaje). ....	59

1.6.7 La unidad para el potencial eléctrico.....	59
1.6.8 La pila eléctrica de Volta.....	60
1.6.9 Analogía entre diferencia de potencial eléctrica e hidráulica. ....	61
1.6.10 La corriente eléctrica .....	61
1.6.11 Intensidad eléctrica: .....	62
1.6.11 La unidad de intensidad de corriente.....	62
1.6.12 Los dos tipos de corriente eléctrica de acuerdo a su carga eléctrica. ....	63
1.6.12 Sentido electrónico real y convencional de la corriente eléctrica.....	64
1.6.13 Corriente eléctrica directa (c.d.).....	64
1.6.14 Corriente alterna (c.a.). ....	65
1.6.15 Principio de generación de la corriente alterna senoidal.....	65
1.6.16 Otros tipos de corriente alterna. ....	67
1.7 CARACTERÍSTICAS DE LA CORRIENTE ALTERNA SINUSOIDAL. ....	68
1.7.1 Corriente directa pulsante.....	69
1.7.2 Corriente directa compuesta o mixta.....	69
1.8 CLASIFICACIÓN DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA DE ACUERDO AL TIPO DE INFORMACIÓN. (SEÑALES ELÉCTRICAS).....	70
1.9 CARACTERIZACIÓN DE UNA SEÑAL DE CORRIENTE ALTERNA. ....	71
1.9.1 Valor pico (o máximo) $V_m$ del voltaje de c.a. ....	71
1.9.2 Valor promedio (o c.d.) $V_{cd}$ del voltaje de una señal sinusoidal. ....	71
1.9.3 Valor rms del voltaje de c.a. ....	72
1.9.4 Valor promedio (o c.d.), $V_{cd}$ del voltaje de una onda senoidal rectificada. ....	73
1.9.4.1 Rectificada de media onda .....	73
1.9.4.2 Rectificador de onda completa con dos diodos. ....	73
1.10 LEY DE OHM.....	74
1.11 CIRCUITOS ELÉCTRICOS. ....	75
1.11.1 Circuito eléctrico en serie.....	77
1.11.2 Circuito eléctrico en paralelo. ....	77
1.11.3 Resistencia equivalente de un circuito en serie. ....	77
1.11.4 Resistencia equivalente de un circuito en paralelo.....	78
1.11.5 Las dos leyes de los circuitos eléctricos de Kirchhoff. ....	80
1.12 NORMAS DE SEGURIDAD EN LA MEDICIÓN DE VARIABLES ELÉCTRICAS.....	82
1.12.1 Descarga eléctrica: .....	82
1.12.2 Riesgos por al manejar de la electricidad .....	84
1.12.3 Accidentes eléctricos. Forma de producirse.....	84
1.12.4 Consejos básicos para usar con mayor seguridad a la electricidad.....	85
1.12.5 Seleccione el instrumento de medida adecuado: .....	87
1.12.6 Errores que suelen cometerse al usar instrumentos de medición de variables eléctricas .....	88
1.12.7 Los reglamentos de seguridad en los laboratorios de medidas eléctricas y electrónicas. ....	88

# Contenido

UNIDAD 2 .....	93
Instrumentos Básicos y Avanzados .....	93
2.1 INTRODUCCIÓN.....	93
2.2 FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN Y APLICACIÓN DE INSTRUMENTOS MEDIDORES ANALÓGICOS Y DIGITALES. ....	94
2.2.1 Medidores analógicos de c.d.....	94
2.2.1.1 Galvanómetro D' Arsonval. ....	94
2.2.1.1.1 Construcción. ....	95
2.2.1.1.2 Principio de funcionamiento del galvanómetro.....	96
2.2.1.2 Galvanómetro electrodinamómetro .....	97
2.2.1.3 El amperímetro analógico de c.d. ....	98
2.2.1.3.1 Ampliación del rango de un amperímetro. ....	99
Ejemplo 2.1 .....	100
2.2.1.3.2 El derivador de Ayrton. ....	100
Ejemplo 2.2. ....	101
2.2.1.4 Voltímetros analógicos de c.d. ....	102
Ejemplo 2.3 .....	102
Sensibilidad de un voltímetro .....	103
Ejemplo 2.4. ....	103
2.1.1.5 Óhmetro .....	104
2.1.1.5.1 Óhmetro serie simple.....	104
2.1.1.5.2 Construcción de la carátula del óhmetro por medio de la tabla de calibración. ....	104
2.1.1.5.3 Óhmetro tipo serie con ajuste de cero. ....	106
Ejemplo 2.5. ....	108
2.1.1.5.4 Óhmetro tipo derivación.....	109
Ejemplo 2.6. ....	111
2.1.1.6 Multímetros analógicos de c.a. y c.d.....	112
2.2.2 Medidores Digitales. ....	116
2.2.2.1 Significado de " $\frac{1}{2}$ " dígito en un DVM. ....	118
2.2.2.2 Funcionamiento del DVM/DMM.....	118
2.2.2.2.1 Comparadores.....	120
2.2.2.2.2 Convertidores digital-analógico. ....	121
2.2.2.2.2.1 Red sumadora resistiva de peso binario. ....	122
2.2.2.2.2.2 La red sumadora resistiva en escalera. ....	123
2.2.2.2.2.3 Convertidores D/A multiplicadores.....	125
2.2.2.2.3 Convertidores analógico-digital. ....	125
2.2.2.2.3.1 Convertidores A/D de rampa de escalera. ....	126
2.2.2.2.3.2 Convertidores A/D de aproximaciones sucesivas. ....	126

2.2.2.2.3.3 Convertidores A/D de doble rampa .....	128
2.2.2.2.3.4 Convertidor de voltaje a frecuencia .....	129
2.2.2.2.4 Conteo y codificación digital .....	130
2.2.2.2.5 Dispositivos de despliegue .....	132
2.2.2.3 Voltímetros digitales .....	134
2.2.2.3.1 Interpretación de las Especificaciones de Exactitud de los Voltímetros Digitales .....	134
2.2.2.3.2 Particularidades y Especificaciones Adicionales de los Voltímetros Digitales .....	135
2.3. FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN Y APLICACIÓN DE OTROS INSTRUMENTOS DE MEDICION .....	136
2.3.1. Osciloscopio analógico .....	136
2.3.1.1 Descripción de las partes fundamentales de un osciloscopio.....	136
2.3.1.1.1 El tubo de rayos catódicos (TRC).....	138
2.3.1.1.2 Desviación electrostática en los TRC.....	140
2.3.1.1.3. Base de tiempo horizontal (voltaje de barrido) .....	142
2.3.1.1.4 Formación de patrones y formas de onda en el osciloscopio .....	142
2.3.1.1.5 Sincronización .....	144
2.3.1.2 Mediciones con el osciloscopio.....	146
2.3.1.3 Sondas o puntas de prueba.....	147
2.3.2. Generador de señales .....	147
2.3.2.1 Descripción.....	148
2.3.2.2 Recomendaciones generales para empezar a utilizar el generador .....	149
2.3.2.3 Las partes principales en el interior de un generador .....	151

## Contenido

Unidad III .....	152
Medición de parámetros .....	152
3.1. Medición y prueba de dispositivos y elementos. ....	152
3.1.1. Resistencias. ....	152
3.1.2 Conductividad y resistencia eléctrica. ....	152
3.1.3 Las resistencias eléctricas comerciales.....	155
3.1.3.1 Clasificación de las resistencias por su valor: .....	155
3.1.3.2 Clasificación de las resistencias por su construcción: .....	155
3.1.3.2.1 Resistencias de hilo bobinado.- .....	155
3.1.3.2.2 Resistencias de carbón prensado.- .....	156
3.1.3.2.3 Resistencias de película de carbón.- .....	156
3.1.3.2.4 Las Resistencias de película metálica. ....	157
3.1.3.2.5 Resistencias de hilo o bobinadas.....	157
3.1.3.2.6 Resistencias de película de óxido metálico.- .....	158
3.1.3.2.7 Resistencias de metal vidriado.- .....	158
3.1.3.3 Valores nominales de una resistencia eléctrica.....	158
3.1.3.4 Empleo del código colores para obtener el valor nominal de la resistencia y tolerancia de una resistencia eléctrica.....	159
3.1.3.5 Medición de resistencia por el método de amperímetro-voltímetro .....	161
3.1.3.5.1 Conexión Corta .....	161
3.1.3.5.2 Conexión Larga .....	162
3.1.4 Errores en las mediciones.....	163
3.1.4.1 Error metodológico .....	163
3.1.5 Puentes de Medición .....	163
3.1.5.1 Puente de Wheatstone.....	164
3.1.5.1.1 Operación básica .....	164
3.1.5.1.2 Errores de medición .....	165
3.1.5.1.3 Circuito equivalente Thévenin.....	165
3.1.5.2 Puente Kelvin.....	169
3.1.5.2.1 Puente doble Kelvin .....	170
3.1.5.2.2 Resistencia de tres terminales.....	172
3.1.2. Medición de capacitancia e inductancia. ....	174
3.1.2.1 Medición de capacitancia en c.d. ....	174
3.1.2.1.1 Tipos de condensadores.....	175

3.1.2.1.2 Identificación de los condensadores. ....	176
3.1.2.1.3 Medición de capacitancia en c.d. con un multímetro digital. ....	177
3.1.2.1.4 Visión general de la medición de capacitancia.....	178
3.1.2.2 Medición de Inductancia. ....	178
3.1.2.2.1 Unidad de medida de la inductancia. ....	179
3.1.2.2.2 Clasificación.....	179
3.1.2.2.3 Codificación.....	180
3.1.2.2.4 Valores Estándares.....	180
3.1.2.2.5 Criterios de Selección.....	180
3.1.2.2.6 Cálculos de inductancia.....	180
3.1.3 Mediciones con puentes. ....	181
3.1.3.1 Intensidad de corriente y tensión senoidales.....	181
3.1.3.2 Impedancia.....	181
3.1.3.3 Ángulo de fase. ....	182
3.1.3.4 Impedancia compleja. ....	183
3.1.3.5 Distintas formas de expresar un número complejo. ....	184
3.1.3.6 Condiciones para el equilibrio del puente de c.a. ....	185
3.1.3.7 Aplicación de las ecuaciones de equilibrio. ....	186
3.1.3.7.1 Puente Maxwell.....	187
3.1.3.7.2 Puente Hay. ....	189
3.1.3.7.3 Puente Schering.....	190
3.1.3.7.4 Puente Wien. ....	194
3.1.4. Prueba de dispositivos semiconductores. ....	196
3.1.4.1 El diodo semiconductor. ....	196
3.1.4.1.1 La teoría del diodo.....	196
3.1.4.1.2 Pruebas con el diodo.....	197
3.1.4.2 Pruebas con los transistores.....	198
3.1.4.2.1 Cómo se puede determinar cuál es la base de un transistor:.....	199
3.1.4.2.2 Uso del multímetro analógico. ....	202
3.2 Medición de potencia y energía. ....	204
3.2.1 Trabajo y Potencia eléctrica c.d.....	204
3.2.2 Electrodinómetro. ....	205
3.2.3 Electrodinómetros en mediciones de potencia.....	207
3.2.4 Medidores de factor de potencia. ....	210
3.3. Efecto de carga de los instrumentos en las mediciones.....	212
3.3.1. Impedancia de los instrumentos de medición. ....	212
3.3.1.1 Error por efecto de carga del amperímetro. ....	212
Ejemplo 3.1.....	212
3.3.1.2 Error por efecto de carga del voltímetro.....	212

Ejemplo 3.2.....	213
3.3.1.2 Impedancia de salida del generador de funciones.....	214
Ejemplo 3.3.....	215
3.3.2. Sondas o puntas de prueba.....	215
3.3.2.1 Mantenimiento.....	216
3.3.2.2 Ajustes de compensación.....	216

## Contenido

Unidad IV .....	219
Instrumentos especiales y virtuales .....	219
4.1 Analizador de estados lógicos. ....	219
4.1.1 El Analizador Lógico.....	219
4.1.2 Modos de muestreo en analizadores lógicos. ....	222
4.1.3 Sistema de disparo. ....	223
4.1.4 Adquisición de datos. ....	225
4.1.5 Sondas y puntas de prueba. ....	226
4.2 Analizador lógico USB-LOGI-500.....	226
4.3 El osciloscopio registrador-analizador lógico 1190 de PeakTech. ....	227
4.4 Analizador lógico del programa Multisim.....	228
4.2 El Analizador de Espectro. ....	233
4.2.1 Características de la corriente alterna sinusoidal.....	233
4.2.2 Visualización de señales en el dominio del tiempo. ....	234
4.2.2.1 Defasamiento $\varphi$ de una señal eléctrica con respecto a otra.....	234
4.2.3 Análisis armónico. Ondas complejas. ....	235
4.2.4 Algunos conceptos básicos en sistemas de comunicación.....	238
4.2.5 El espectro de ondas electromagnéticas.....	240
4.2.2 Visualización de señales en el dominio de la frecuencia. ....	241
4.2.2.1 Introducción al analizador de espectro .....	241
4.2.2.2 El analizador de espectro y los diferentes tipos disponibles .....	242
4.2.2.3 Analizadores espectrales híbridos. ....	244
4.2.2.3.1 Analizador de barrido superheterodino .....	244
4.2.2.4 El analizador de espectro (Spectrum Analyzer) en el Software Multisim. ....	246
4.2.2.4.1 Ejemplos de aplicación del programa MULTISIM. ....	249
Ejemplo 1.....	249
Ejemplo 2.....	250
Ejemplo 3.....	250
Ejemplo 4. Análisis de la onda cuadrada con Multisim. ....	251
Ejemplo 5. Señales de RF moduladas .....	252
4.3 Equipos especiales de medición .....	254
4.3.1 Graficadores-registradores.....	254
4.3.1.1 Importancia de la representación gráfica de datos experimentales .....	255
4.3.1.2 Graficadores-registradores de cinta. ....	257
4.3.1.2.1 El reloj de agua de Ktsibios (300 años A.C.).....	258
4.3.1.2.2 El sismógrafo. ....	258

4.3.1.2.3 El termohigrógrafo .....	259
4.3.1.2.3.1 Características del instrumento.....	259
4.3.1.3 Graficadores-registradores circulares. ....	260
4.3.1.4 Graficadores-registradores sin papel. ....	260
4.3.1.4.1 Graficador digital sin papel LBVR1706.....	261
4.3.2 El trazador de curvas .....	262
4.3.2.1 El trazador de curvas HM6042 .....	263
4.3.2.1.1 Mandos de Control.....	264
4.3.2.1.1 Indicaciones de funcionamiento. ....	265
4.3.2.1.2 Conexión de los componentes .....	266
4.3.2.1.3 Elección del tipo de componente. ....	266
4.3.2.1.4 Presentación del conjunto de curvas. ....	266
4.3.2.1.5 Elección de los parámetros .....	268
4.3.2.1.6 Utilización de las funciones de memoria MEM .....	269
4.3.2.1.7 Ejemplos de aplicación. Transistores bipolares .....	269
4.3.2.1.8 Presentación de las curvas características para transistores de efecto de campo .....	269
4.3.2.2 Uso del Analizador IV del programa MULTISIM como trazador de curvas.....	269
4.3.2.2.1 Cuadro de diálogo Simulate Parameters. ....	271
4.3.2.2.2 Parámetros de diodos. ....	271
4.3.2.2.3 Parámetros del BJT PNP .....	272
4.3.2.2.4 Parámetros del FET PMOS.....	274
4.3.2.2.5 Parámetros FET NMOS .....	274
4.3.2.2.6 Revisión de Datos del Analizador I-V. ....	275
4.3.3 El luxómetro. ....	279
4.3.3.1 Conceptos básicos de iluminación.....	279
4.3.3.1.1 Intensidad luminosa. ....	280
4.3.3.1.2 Definición de esterradián. ....	281
4.3.3.1.3 Flujo luminoso, $\Phi$ .....	282
4.3.3.1.4 El flujo luminoso como la cantidad de líneas de luz (rayos) que incide sobre una superficie. ....	282
4.3.3.1.5 Iluminación o iluminancia:.....	282
4.3.3.1.6 Ley inversa de los cuadrados.....	283
4.3.3.1.7 Luminancia: .....	283
4.3.3.1.8 Rendimiento luminoso. ....	284
4.3.3.1.9 Visibilidad. ....	285
4.3.3.1.10 Características de la visión humana .....	285
4.3.3.1.11 Percepción visual .....	286
4.3.3.2 Funcionamiento del luxómetro .....	287
4.3.3.3 El luxómetro Extech 401025 .....	288

4.3.3.3.1 Características importantes:.....	288
4.3.3.3.2 Descripción del Panel Frontal .....	289
4.3.3.3.3 Operación. ....	289
4.3.3.3.4 Selección de Escala .....	290
4.3.3.3.5 Procedimiento a cero .....	290
4.3.3.3.6 Salida análoga.....	291
4.3.3.4 Luxómetro con función de conexión a una computadora.....	291
4.3.3.4.1 Características .....	291
4.3.3.4.2 Descripción del medidor.....	292
4.3.3.4.3 Descripción de la pantalla.....	292
4.3.3.4.4 Operación .....	293
4.3.3.4.4.1 Unidad de medida .....	293
4.3.3.4.4.2 Selección de escala .....	293
4.3.3.4.4.3 Toma de medidas .....	293
4.3.3.4.4.4 Retención de datos.....	293
4.3.3.4.4.5 Retención de picos .....	293
4.3.3.4.4.6 Lectura máxima (MAX) y mínima (MIN) Memoria .....	293
4.3.3.4.4.7 Modo relativo .....	293
4.3.3.4.4.8 Retroiluminación LCD .....	294
4.3.3.5 Conexión USB para PC .....	294
4.3.3.5.1 Descripción .....	294
4.3.3.5.2 Especificaciones de escala .....	294
4.3.4. Tacómetro. ....	295
4.3.4.1 Diferencias entre un tacómetro analógico y un tacómetro digital: .....	295
4.3.4.2 Tacómetro centrífugo.....	296
4.3.4.3 Los tacómetros eléctricos.....	296
4.3.4.4 Tacómetro de corrientes Foucault .....	296
4.3.4.5 Tacómetros por conteo de pulsos .....	297
4.3.4.6 Generación por inducción magnética.....	297
4.3.4.7 Generación óptica .....	298
4.3.5 Medidores de campo magnético .....	299
4.3.5.1 Factores del campo EM al que se está expuesto.....	299
4.3.5.1.1 Efectos .....	300
4.3.5.2 Concepto de campo magnético. ....	300
4.3.5.2.1 Los imanes. ....	300
4.3.5.2.2 Líneas de campo magnético, flujo magnético e intensidad de campo magnético.....	301
4.3.5.2.3 Magnetismo terrestre. ....	301
4.3.5.2.4 La brújula. El primer magnetómetro. ....	302

4.3.5.2.5 Descubrimiento del electromagnetismo. ....	302
4.3.5.2.6 Ley de Ampère. ....	303
4.3.5.2.7 Campo magnético creado por un solenoide: .....	304
4.3.5.2.8 Ley de Faraday.....	304
4.3.5.2.9 Fuerza electromotriz inducida por la variación de la intensidad del campo magnético. ....	305
4.3.5.2.10 Principio del generador de corriente eléctrica. ....	305
4.3.5.3 Medidores de campo.....	306
4.3.5.4 Información sobre los campos electromagnéticos.....	307
4.3.5.5 El Teslámetro PCE-G28 .....	307
4.3.5.5.1 Características principales. ....	308
4.3.5.5.2 Ejemplo de utilización del teslametro PCE-G28.....	308
4.3.5.6 Variación del campo magnético con la distancia.....	308
4.3.6 Analizador de Fourier. ....	309
4.3.6.1 Conceptos básicos. ....	309
4.3.6.2 La serie de Fourier de una onda cuadrada. ....	310
4.3.6.3 Descomposición espectral de otras formas de onda: .....	312
4.3.6.4 Análisis de Fourier en el programa Multisim.....	313
4.3.6.5 Configuración de los parámetros de análisis de Fourier para uso normal .....	315
4.4 Introducción al manejo de instrumentos virtuales.....	317
4.4.1 Evolución de la instrumentación. ....	317
4.4.2 Instrumentación Electrónica .....	319
4.4.3 Componentes del instrumento virtual. ....	320
4.4.3.1 Hardware de adquisición de datos. ....	320
4.4.3.2 Acondicionamiento de señal. ....	321
4.4.3.3 Software de programación y control.....	321
4.4.3.4 Buses y protocolos de comunicación en instrumentación virtual.....	322
4.4.4 Ventajas de la instrumentación virtual frente a la instrumentación tradicional.....	322
4.4.5 Resumen:.....	323

## Contenido

Unidad 5.....	324
Diseño y elaboración de tarjetas de circuitos impresos. ....	324
5.1. Introducción a los circuitos impresos.....	324
5.1.1. Diseño del proyecto. ....	324
5.1.2. Elección o diseño del circuito.....	325
5.1.3. Consecución de materiales. ....	325
5.1.4. Ensayo en protoboard.....	326
5.1.5. Diseño y elaboración del circuito impreso (PCB). ....	326
5.1.5.1. Descripción de la placa de cobre para PCB. ....	326
5.1.5.2. Técnicas para el diseño del fotolito para circuitos impresos. ....	328
5.1.5.3. Técnica de grabado directo a la placa con marcador de tinta permanente. ....	328
5.1.5.4 Recomendaciones:.....	329
5.1.5.5 Normas.....	329
5.1.5.6 Recursos Especiales... El Jumper (o puente).....	331
5.1.6. Ensamble de componentes. ....	332
5.1.7. Pruebas y corrección de fallas del PCB.....	332
5.2. Diseño de PCB mediante software.....	333
5.2.1. Diseño del fotolito del circuito denominado <i>Luz nocturna automática</i> usando la técnica del marcador de tinta indeleble. ....	333
5.2.2 Diseño del fotolito con <i>PCB Wizard</i> de <i>Livewire</i> . ....	340
5.2.2.1 La ventana de entrada del programa. ....	340
5.2.2.2 Realización de esquemas. ....	341
5.2.2.3 Diseño de un circuito impreso a partir de un esquema. ....	344
5.2.2.4 Cambio del modelo de un componente.....	344
5.2.2.5 Otras opciones para el diseño con el PCB-Wizard.....	347
5.2.2.6 Modificación de un circuito.....	351
5.2.2.6.1 Mover o girar componentes: .....	351
5.2.2.6.2 Modificar el grosor de las pistas: .....	352
5.2.2.6.3 Modificar el tamaño y forma de un circuito:.....	352
5.2.2.6.4 Insertar texto, objetos y relación de componentes: .....	353
5.2.2.7 Resumen de lo obtenido mediante <i>PCB WIZARD</i> . ....	353
5.2.3 Diseño del fotolito con <i>Ultiboard</i> de <i>Multisim</i> . ....	353
5.2.3.1 Asignación de footprint para el conector J1: .....	355
5.2.3.2 Ahora el potenciómetro R3 lo vamos asociar con POT13M, bajo el mismo procedimiento. ....	357

5.2.3.3 Procedimiento para asignar footprint a R4. ....	358
5.2.3.4 Procedimiento para asignar footprint a R1 y R2. ....	359
5.2.3.5 Procedimiento para asignar footprint al transistor Q1. ....	360
5.2.3.6 Procedimiento para asignar footprint al LED1. ....	360
3.2.3.7 Transfiriendo de Multisim a Utilboard. ....	362
5.3. Técnicas básicas para la construcción de circuitos impresos. ....	370
5.3.1. Impresión del fotolito en la placa de cobre. ....	370
5.3.2. Ataque químico. ....	376
5.3.3. Punzonado y taladrado de los agujeros a perforar en las islas. ....	379
5.3.4 Ensamble de componentes. ....	380
5.3.5 Prueba del funcionamiento del circuito. ....	382
BIBLIOGRAFÍA. ....	383

## UNIDAD 1<sup>1</sup>

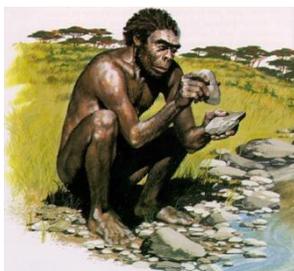
### Conceptos Básicos

Si se mide lo que se hace, se puede controlar.  
Si se puede controlar, se puede dirigir.  
Y si se puede dirigir, se puede mejorar.

- 1.1. Concepto de medida.
- 1.2. Metrología.
- 1.3. Normas oficiales en México.
- 1.4. Elementos de la medición.
- 1.5. Sistemas de unidades y patrones.
- 1.6. Tipos de corriente eléctrica.
- 1.7. Características de la corriente alterna sinusoidal.
- 1.8. Clasificación de la corriente eléctrica de acuerdo al tipo de información. (Señales eléctricas)
- 1.9. Caracterización de una señal de corriente alterna.
- 1.10. Ley de Ohm.
- 1.11. Circuitos eléctricos
- 1.12. Normas de seguridad en la medición de variables eléctricas.

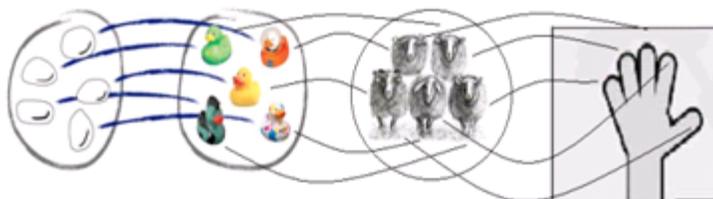
#### 1.1 CONCEPTO DE MEDIDA.

##### 1.1.1 Contar. Sus orígenes.



La necesidad del ser humano por contar y medir objetos surge desde la aparición del primer hombre en la tierra. Uno de los primeros conceptos desarrollados por el hombre fue el de número, pues tenía la necesidad saber cuantitativamente algunas cosas que se encontraba a su alrededor. Así, los primeros grupos humanos se encontraron muy pronto con el problema de determinar de entre dos conjuntos cuál era "mayor" que otro, o de conocer con precisión cuantos elementos formaban una colección de cosas (los integrantes de su tribu, por ejemplo). Esos problemas serían resueltos contando. El desarrollo de la habilidad de contar en el ser humano, no es un fenómeno simple, aunque la mayoría de las culturas llegaron a disponer de sistemas de conteo que permitieron contar como mínimo centenas, algunos otros pueblos con una cultura simple, sólo alcanzaron usar símbolos para los números 1, 2 y 3 y "muchos" para cantidades mayores.

El conteo se inició por medio de la correspondencia uno a uno entre los elementos del conjunto a contar con objetos físicos (tales como piedras y de marcas talladas en huesos). Los sistemas numerales de la mayoría de las lenguas antiguas reflejan que la operación de contar estuvo asociado al conteo con los dedos (razón por la cual los sistemas de base decimal y vigesimal son los más abundantes), aunque hay testimonio del empleo de otras bases numéricas.



Conteo: uso de la correspondencia uno a uno (correspondencia Biunívoca)

<sup>1</sup> Apegado al programa de la asignatura actualizado, según CIRCULAR No. M00.2.1/014/2016 del Tec.N.M. 06/06/ 2016.

### 1.1.2 Concepto de número.

Después de la adquisición de la habilidad contar siguió la formación del concepto o idea de número (la abstracción numérica). La abstracción numérica se refiere a la captación y representación de la cualidad común a los conjuntos contados: el valor numérico en una colección de objetos.



La formación del concepto o idea de número

Posteriormente, los hombres tienen necesidad de explorar nuevos territorios en busca de mejores condiciones de vida, por lo que tuvieron que realizar algunas mediciones a partir de unidades muy rudimentarias. Las primeras mediciones estuvieron relacionadas con la longitud, el tiempo y el peso (o la masa).<sup>2</sup> Con respecto a la medición del tiempo, debió utilizarse como referencias las jornadas solares o ciclos de la luna, o de las estrellas. En cuanto a la longitud debió utilizar las medidas corporales (pies, brazas...) o se medían distancias relacionándolas con el tiempo, a partir de lo que se podía recorrer a pié en un día. Por último, las masas se comparaban de acuerdo con la sensibilidad muscular. Todas estas unidades de medida resultaban imperfectas, ya que variaban de individuo a individuo y de un lugar a otro, lo que comenzó a crear dificultades a la hora de establecer las primeras relaciones comerciales entre los hombres.

También, al paso del tiempo, por el propio desarrollo de las actividades económicas, del comercio, la industria y la ciencia, el hombre se vio obligado al desarrollo paulatino de mediciones de otras magnitudes importantes de nuestra vida cotidiana hoy día. Actualmente, en la vida diaria constante o permanentemente hacemos diversas mediciones, por ejemplo: el tiempo que toma trasladarse de un lugar a otro, la velocidad del automóvil en el cual nos desplazamos, etc.



### 1.1.3 Medir y medida.

- **Medir** es una de las actividades continuas y primordiales para todo ser humano, consiste en comparar cuantitativamente una magnitud de valor desconocido (mensurando)<sup>3</sup> con una determinada unidad de medida previamente establecida para determinar cuántas veces dicha unidad se encuentra contenida en la magnitud en cuestión.
- **Medida** es definida por el Diccionario de la Real Academia Española, como:
  - a) Expresión del resultado de una medición.
  - b) Cada una de las unidades que se emplean para medir longitudes, áreas o volúmenes de líquidos o áridos<sup>4</sup>;
  - c) Proporción o correspondencia de algo con otra cosa.

<sup>2</sup> La historia de la Física muestra que estos conceptos, masa y peso, han sido difíciles de definir. Desde que aparecen de forma más o menos neblinosa, hasta hoy, han sufrido importantes cambios y, por tanto, sus definiciones también lo han hecho. Fue Isaac Newton quien por primera vez distinguió más precisamente la diferencia conceptual entre masa y peso.

<sup>3</sup> Magnitud particular sometida a medición

<sup>4</sup> **Áridos.** Granos, legumbres y frutos secos a los que se aplican medidas de capacidad.

#### **1.1.4 Incertidumbre en una medición.**

El resultado de una medición no está completo si no posee una declaración de la incertidumbre de la medición con un nivel de confianza determinado. De ningún modo es la incertidumbre de la medición un término equivalente al error de la medición o a la precisión de la misma bajo condiciones de repetibilidad o reproducibilidad.

El cálculo de la incertidumbre de la medición juzga cuánto conocemos de los procesos de medición en los que nos desempeñamos, el nivel de la gestión de la calidad de los mismos, y por consiguiente saca a relucir las virtudes y los defectos que soportan las mediciones que realizamos.

Desde el punto de vista más elemental, la medición es un proceso que tiene por objetivo determinar el valor de una magnitud particular, es decir del mensurando, siguiendo una serie de operaciones bien definidas, las cuales deben estar documentadas. Este proceso incluye el acto en sí de medir para la adquisición de los datos, el procesamiento de los mismos y la expresión del resultado final.

Siempre que se realiza una medición inevitablemente se cometen errores debido a muchas causas, algunas pueden ser controladas y otras son incontrolables o inclusive desconocidas. Por lo tanto, para realizar mediciones con calidad y obtener resultados confiables es necesario que la persona que realiza la medición tenga el conocimiento, la técnica y la disciplina necesarios. El conocimiento y la comprensión de la metrología como ciencia de las mediciones, y el dominio los instrumentos de medición empleados. La técnica adquirida con el hábito de medir que lleva a la formación de la experiencia y al desarrollo de habilidades, insustituibles siempre que se han de realizar buenas mediciones.

La disciplina que sólo se consigue pensando antes de hacer, sobre la base de procedimientos normalizados, y realizando las operaciones ordenadamente, registrando correctamente los resultados.

Cuando se expresa el resultado de la medición, además del valor estimado del mensurando, es necesario evaluar y expresar la incertidumbre de la medición como valoración de la calidad del resultado de la medición. La incertidumbre de la medición es considerada como una figura de mérito, es decir, un índice de calidad de la medición que proporciona una base para la comparación de los resultados de las mediciones, dando una medida de la confiabilidad en los resultados.

La mayoría de las mediciones son realizadas con instrumentos sujetos a la calibración o verificación periódica. Si se conoce que estos instrumentos están en conformidad con los errores máximos permisibles establecidos en sus especificaciones o en documentos normativos aplicados y que las diferentes fuentes de incertidumbre que intervienen en el proceso de medición pueden ser cuantificadas o minimizadas, la incertidumbre asociada con el resultado de la medición puede ser calculada para la totalidad de las situaciones prácticas.

Como el resultado de una medición se expresa generalmente como un valor medido único y una incertidumbre de medida. Si la incertidumbre de medida se considera despreciable para un determinado fin, el resultado de medida puede expresarse como un único valor medido de la magnitud.

#### **1.1.5 Calibración.**

Calibración: conjunto de operaciones que permiten establecer en condiciones especificadas la relación existente entre los valores indicados por el instrumento de medida o un sistema de medida o un material de referencia y los correspondientes valores conocidos del "mensurado"<sup>5</sup> (valores de una magnitud obtenidos mediante un patrón de referencia).

De acuerdo con *The Automation, Systems, and Instrumentation Dictionary* la calibración se define como una prueba de comparación del equipo de medición contra un instrumento estandarizado (patrón) de alta precisión y exactitud con la finalidad de detectar, correlacionar, ajustar, rectificar y documentar la exactitud del instrumento que está siendo comparado. De otro modo, un instrumento estará descalibrado si, al compararlo

---

<sup>5</sup> El mensurando de la medición se refiere al objeto que se está midiendo o calculando sus mediciones.

*con otro instrumento patrón, la lectura se aparta del valor de la exactitud dado por el fabricante. La calibración deberá ser ejecutada con referencia a una tolerancia*

En los instrumentos digitales inteligentes, los datos de calibración están almacenados en una EPROM<sup>6</sup> y de este modo están corregidas con exactitud las no linealidades de los sensores para toda la vida útil del instrumento.

Si un instrumento recién salido de fábrica, poco a poco o rápidamente, dependiendo de las condiciones del proceso se irá descalibrando. Las causas pueden ser golpes, deriva eléctrica, temperatura, etc., de modo que será necesario establecer fechas de calibración que vuelvan a poner al instrumento en las mismas condiciones que las iniciales.

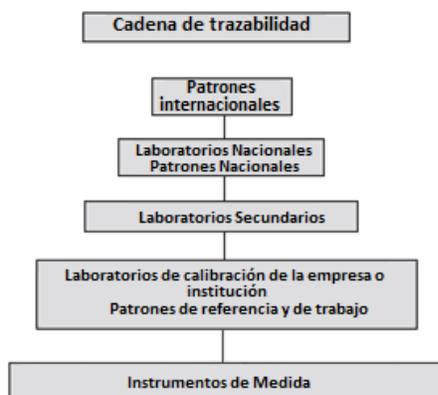
Cuando se realiza una operación de calibración, se compara el instrumento a calibrar con un aparato patrón para averiguar si el error (diferencia entre el valor leído por el instrumento y el verdadero valor medido con el aparato patrón) se encuentra dentro de los límites dados por el fabricante del instrumento. Como el aparato patrón no permite medir exactamente el valor verdadero (también tiene un error) y como además en la operación de comparación intervienen diversas fuentes de error, no es posible caracterizar la medida por un único valor, lo que da lugar a la llamada incertidumbre de la medida.

Los errores que ocurren necesariamente al realizar la medida de una magnitud, hacen que se tenga una inseguridad sobre el verdadero valor de la medida. La incertidumbre es la evaluación de la dispersión de los valores de las mediciones con respecto al valor verdadero de la magnitud medida.

La incertidumbre de la medida es un estimado de la magnitud expresada con un nivel de confianza determinado. Por ejemplo, la medida de una densidad es de 5.1 mg/litro con tolerancia de 0.2 mg/litro para un nivel de confianza de 95%. ¿Qué significado tiene esta descripción? Existe la probabilidad de 95% de que el valor verdadero de la densidad se encuentre dentro del intervalo de 4.9 a 5.3 mg/litro, es decir, existe 1 posibilidad entre 20 (5%) de que el valor verdadero de la densidad este fuera del campo (4.9 – 5.3).

### 1.1.6 La trazabilidad.

Es una propiedad relacionada al resultado de las mediciones efectuadas con un instrumento o con un patrón, tal que puede relacionarse con patrones nacionales o internacionales, a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones, todas ellas con incertidumbres determinadas en cada comparación. Cada paso en la cadena debe documentarse en un informe de calibración. La única forma en que pueden compararse los resultados obtenidos por diferentes sistemas de medición en diferentes lugares del mundo es asegurando su trazabilidad, es decir, que ambos estén referidos al patrón internacional [en general a las unidades del Sistema Internacional (SI)]. Como se ve, este es uno de los atributos indispensables para garantizar la confiabilidad de cualquier resultado de medición.



<sup>6</sup> EPROM son las siglas de Erasable Programmable Read-Only Memory (memoria de solo lectura, programable y borrable).



### 1.1.7 Repetibilidad de los resultados.

Cuando hacemos referencia a repetir una medición bajo las mismas condiciones (condiciones de repetibilidad), esto significa que ninguno de los factores que intervienen en la medición cambia, es decir:

- El mismo mensurando;
- El mismo observador;
- El mismo instrumento de medición, utilizado bajo las mismas condiciones;
- El mismo lugar;
- La repetición de la medición en un corto intervalo de tiempo.

### 1.2 METROLOGIA.

La acción de medir ha llevado a la construcción de un área del conocimiento denominada metrología. Podemos decir de manera general que **metrología es la ciencia de las mediciones**. En la metrología se entrelazan la tradición y el cambio, pues los sistemas de medición reflejan las costumbres de los pueblos y, al mismo tiempo, la búsqueda de nuevos patrones y formas de medir como parte del progreso y la evolución.

Con el desarrollo del comercio y la industria a nivel mundial, la metrología adquiere mayor importancia al enfatizarse su relación con la calidad, la calibración, la acreditación y la certificación. La metrología permite el ordenamiento de estos elementos y su operación coherente con el objetivo de mejorar y garantizar la calidad de productos y servicios.<sup>7</sup>

Las mediciones exactas y precisas son fundamentales para los gobiernos, las empresas y la población, ya que facilitan y aseguran las transacciones comerciales de productos cuyas cantidades y características se comprometen en un contrato entre el cliente (consumidor) y el proveedor (fabricante). De esta manera, se protege al consumidor, se contribuye a preservar el medio ambiente y a usar racionalmente los recursos naturales.

Las actividades relacionadas con la Metrología dentro de un país son responsabilidad de una o varias instituciones autónomas o gubernamentales. En México, La Dirección General de Normas de la Secretaría de Economía, tiene entre sus atribuciones la aplicación de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.<sup>8</sup> Además, se cuenta con el Centro Nacional de Metrología (CENAM)<sup>9</sup> y la Comisión Nacional de Normalización (CNN), organismos descentralizados de la misma Secretaría con el fin de apoyar al sistema metroológico nacional.

El CENAM es el laboratorio nacional de referencia en materia de mediciones. Es responsable de establecer y mantener los patrones nacionales, ofrecer servicios metroológicos como calibración de instrumentos y

<sup>7</sup> <http://www.cenam.mx/eventos/enme/docs/51%20Acreditacion%20EMA.pdf>

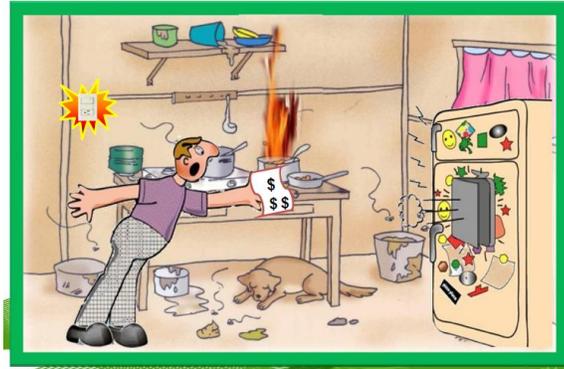
<sup>8</sup> Diario Oficial de la Federación 1 de julio de 1992. Última reforma publicada el 18 de diciembre de 2015.

<sup>9</sup> <http://www.cenam.mx/acerca/>. Sitio oficial.

patrones<sup>10</sup>, certificación y desarrollo de materiales de referencia, cursos especializados en metrología. Mantiene un estrecho contacto con otros laboratorios nacionales y con organismos internacionales relacionados con la metrología, con el fin de asegurar el reconocimiento internacional de los patrones nacionales de México y, consecuentemente, promover la aceptación de los productos y servicios de nuestro país.

La CNN<sup>11</sup> tiene como principales funciones aprobar anualmente el Programa Nacional de Normalización, establecer reglas de coordinación entre las dependencias y entidades de la administración pública federal para la elaboración y difusión de normas, resolver las discrepancias que puedan presentarse en los comités consultivos nacionales de normalización y opinar sobre el registro de organismos nacionales de normalización.

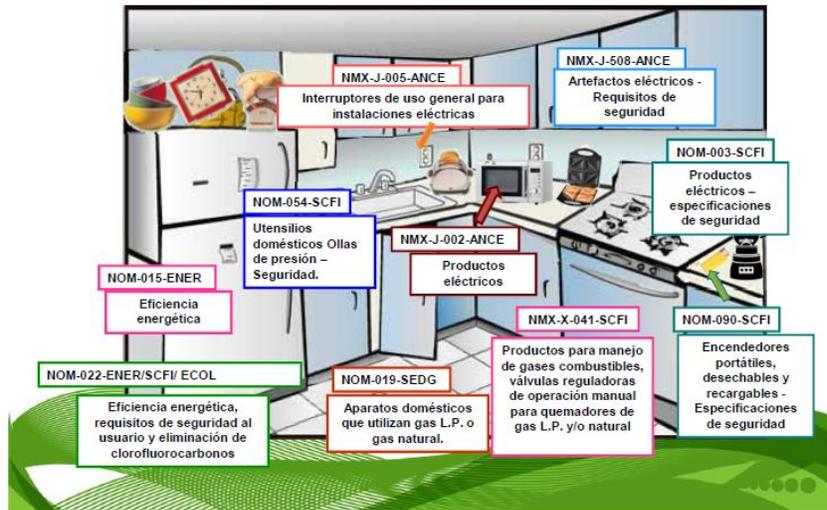
### 1.3 NORMAS OFICIALES EN MÉXICO.



Un sitio carente de normas.

De acuerdo con la Ley Federal sobre Metrología y Normalización básicamente existen tres tipos de normas:

- a) **Normas Oficiales Mexicanas (NOM)**.-son regulaciones técnicas de carácter obligatorio. Regulan los productos, procesos o servicios, cuando éstos puedan constituir un riesgo para las personas, animales y vegetales así como el medio ambiente en general, entre otros.



Normas en utensilios domésticos.

<sup>10</sup> <http://www.cenam.mx/patrones/Default.aspx>

<sup>11</sup> <http://www.2006-2012.economia.gob.mx/comunidad-negocios/normalizacion/nacional/procesos-de-normalizacion/comision-nacional-normalizacion>

**b) Normas Mexicanas (NMX).**- son elaboradas por un organismo nacional de normalización, o la SE. Establecen los requisitos mínimos de calidad de los productos y servicios, con el objetivo de proteger y orientar a los consumidores.

**c) Normas de Referencia (NRF).**- son elaboradas por las entidades de la administración pública para aplicarlas a los bienes o servicios que adquieren, arrienden o contraten, cuando las normas mexicanas o internacionales no cubran los requerimientos de las mismas o sus especificaciones resulten obsoletas o inaplicables.

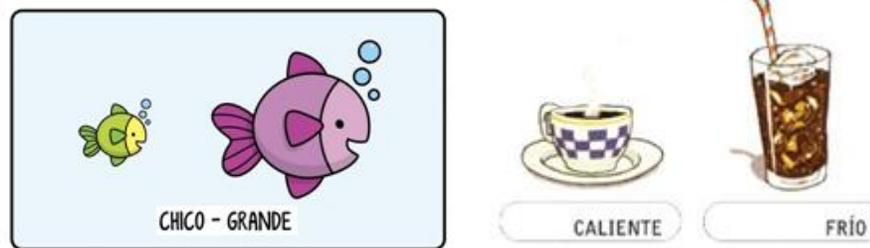
#### 1.4 ELEMENTOS DE LA MEDICION

En todo proceso de medición intervienen tres elementos fundamentales:

1. La **magnitud** (propiedad del objeto o fenómeno que se desea medir).
2. El **instrumento** o aparato de medición utilizado.
3. El método de medición.
4. La unidad de medida (o **patrón**) que se toma como base de comparación.

##### 1.4.1 Magnitudes físicas.<sup>12</sup>

Uno de los primeros conceptos que los niños aprenden es el concepto de *relación de orden*. Comparar dos objetos y decidir correctamente cuál es “más pequeño que”, “más grande que” o “igual a”. Esta noción de comparación está profundamente asociada a la idea de magnitud, en el sentido físico del vocablo.



Por ello, podemos definir una magnitud como aquella propiedad de los objetos que nos permite apreciarlos como iguales, mayores o menores que otros objetos homogéneos con ellos.

Pero el ser humano no se ha conformado con establecer únicamente esa relación de orden entre objetos, sino que ha ido más allá: se exige hacer mediciones. ¿Qué se necesita medir? ¿Qué se compara? : una propiedad o una cualidad de un objeto o fenómeno.

***Las magnitudes metrológicas<sup>13</sup> son cualidades o características de los cuerpos, plenamente identificadas<sup>14</sup>, susceptibles de ser medidas o comparadas cuantitativamente con un patrón o unidad básica.***

<sup>12</sup> Se recomienda revisar los conceptos vertidos en el *Vocabulario Internacional de Metrología – Conceptos fundamentales y generales y términos asociados (VIM). 3ª Edición en español 2012 del JCGM* (Comité Conjunto para las Guías en Metrología), organismo integrado por las siete organizaciones internacionales, entre ellas la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) y de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), de las cuales es miembro desde su fundación México. <http://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>

<sup>13</sup> Ciencia de la medida. Comprende todos los aspectos, tanto teóricos como prácticos, que se refieren a las mediciones

<sup>14</sup> La Investigación Científica está encaminada a detectar estas características y profundizar el conocimiento de acerca de ellas.



Por ejemplo, **altura de un vaso** es una magnitud de tal objeto. Para medir esa magnitud se compara con una unidad de longitud (que puede ser el metro), lo que produce una medida o una cantidad expresada en metros. Se puede medir otros objetos que tengan la propiedad **altura**: personas, edificios, árboles, estanterías,... todo elemento que posea altura.

Hay magnitudes físicas que no son tan fáciles de medir. Por ejemplo, la temperatura de un cuerpo es una propiedad que el hombre primitivo percibió. Las primeras valoraciones de la temperatura dadas a través del tacto fueron simples, en relación a la temperatura de su cuerpo, sólo podía decir “caliente, tibio, frío y muy frío” Mucho tiempo después, sólo cuando inventa instrumentos de medición de la temperatura, se pueden establecer valoraciones más precisas.

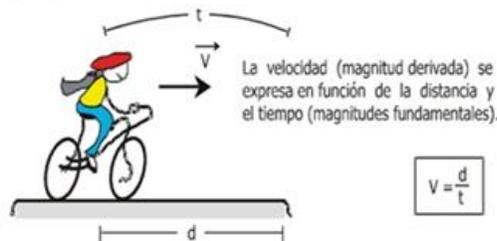
#### 1.4.1.1 Tipos de magnitudes físicas:

Las magnitudes físicas pueden ser clasificadas de acuerdo a varios criterios:

##### 1.4.1.1.1 Por su origen:

- Las magnitudes físicas **base o fundamentales**. **Constituyen** un subconjunto de magnitudes, elegido por convenio, dentro de un **sistema de magnitudes** dado, de tal manera que ninguna magnitud del subconjunto pueda ser expresada en función de las otras. Actualmente, en el Sistema Internacional de Unidades (SI), son la masa, la longitud, el tiempo, la intensidad de corriente eléctrica, la temperatura, la intensidad luminosa y la cantidad de sustancia.
- Son magnitudes **derivadas**, porque surgen de las relaciones o de las leyes físicas de la naturaleza, como la fuerza, la densidad, la temperatura, la velocidad, la aceleración y la energía. Sus unidades se establecen usando dimensiones o magnitudes fundamentales.

**Ejemplo:**



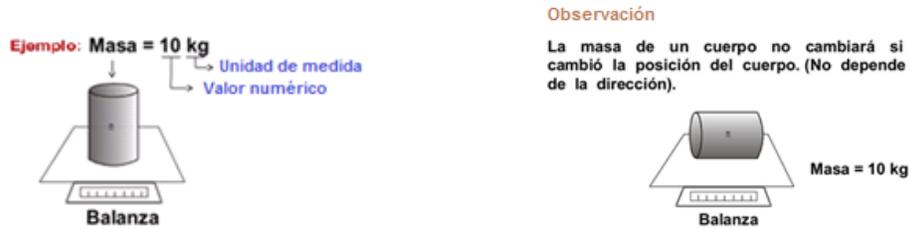
- **dimensión de una magnitud**. Expresa la dependencia de una **magnitud** en términos de las **magnitudes de base**, dentro de un **sistema de magnitudes**, como el producto de potencias de factores correspondientes a dichas magnitudes de base.

Por ejemplo, la expresión dimensional de la magnitud fuerza es

$$\dim F = MLT^{-2} = (\text{masa})(\text{longitud})(\text{tiempo})^{-2}$$

1.4.1.1.2 Por su naturaleza matemática, las magnitudes se clasifican en escalares y vectoriales:

- Las **magnitudes escalares** son aquellas que quedan completamente definidas por un número y las correspondientes unidades utilizadas para su medida. Son magnitudes escalares: la masa, el tiempo, el trabajo, la longitud, la energía, etc.

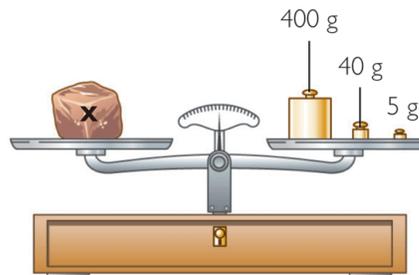


- Las **magnitudes vectoriales** son aquellas que quedan caracterizadas por una cantidad (también se le denomina intensidad o módulo), una dirección y un sentido. Ejemplos de estas magnitudes son: la velocidad, la aceleración, la fuerza, el campo eléctrico, intensidad luminosa, resistencia eléctrica, etc.



1.4.1.1.3 Según su actividad, se clasifican en magnitudes extensivas e intensivas:

- Una **magnitud extensiva** es una magnitud que depende de la cantidad de sustancia que tiene el cuerpo o sistema. Las magnitudes extensivas son **aditivas**, se suman algebraicamente. Si consideramos un sistema físico formado por dos partes o subsistemas, el valor total de una magnitud extensiva resulta ser la suma de sus valores en cada una de las dos partes.



Entre las magnitudes extensivas tenemos el peso, el volumen y la masa.

- Una **magnitud intensiva** es aquella cuyo valor no depende de la cantidad de materia o del tamaño del sistema involucrado y puede medirse su valor en un punto en el espacio y depender del tiempo. Las magnitudes intensivas tienen el mismo valor para todo sistema en equilibrio que para cada una de sus partes consideradas como subsistemas. Las magnitudes intensivas se miden siempre respecto a una referencia, es decir como diferencia o como vector. Ejemplos: la densidad, la temperatura y la presión de un sistema termodinámico en equilibrio.

También son propiedades intensivas el olor, el sabor, el brillo, la ductibilidad, la dureza, la maleabilidad, la tensión superficial, la tenacidad e incluso la compresibilidad. De la misma manera, pueden incluirse en esta categoría otras características como la elasticidad o la viscosidad. Esta última podemos decir que es una propiedad intensiva que hace referencia a la capacidad que tiene una materia, líquido e incluso gas de ofrecer resistencia a lo que son los cuerpos que tiene en su seno.

**Ejemplo.-** El caso del **etanol**. El **punto de ebullición** de este alcohol es de **78,4 grados centígrados**. Debido a que el punto de ebullición es una propiedad intensiva, resulta indiferente si se dispone de 1 litro, 5 litros, 20 O 100 litros de etanol: en todos los casos, entrará en ebullición al alcanzar la mencionada temperatura



#### 1.4.1.2 Relación entre magnitudes intensivas y extensivas.

En general, el cociente entre dos magnitudes extensivas da como resultado una magnitud intensiva. Ejemplo: masa dividida por volumen representa densidad.

Maxwell<sup>15</sup> notó que las diferentes formas de energía puede descomponerse en dos factores: un factor que tiene propiedades intensivas, y otro factor que tiene propiedades extensivas. Se puede escribir:

$$\text{Energía} = \text{Intensidad} \times \text{Extensidad.}$$

La descomposición de la energía en dos factores corresponde a una realidad física. No es lo mismo levantar un objeto que pesa 1 N de 0 a 10 m, que elevar otro objeto que pese 100 N de 0 a 10 cm, aunque se gaste la misma cantidad de energía.

$$W_1 = (1 \text{ N}) \times (10 \text{ m}) = 10 \text{ J}$$

$$W_2 = (100 \text{ N}) \times (0.10 \text{ m}) = 10 \text{ J}$$

Energía	Intensidad	Extensidad
Trabajo Mecánico	Fuerza (newton)	Longitud (metro)
Energía Eléctrica	Potencial Eléctrico (volt)	Carga (coulomb)
Energía Potencial	Altura por aceleración $(\text{metro}) \left( \frac{\text{metro}}{\text{segundo}^2} \right) = \left( \frac{\text{metro}^2}{\text{segundo}^2} \right)$	Masa (kilogramo)
Energía Cinética	Velocidad $\left( \frac{\text{metro}}{\text{segundo}} \right)$	Cantidad de Movimiento $(\text{ki log ramo}) \left( \frac{\text{metro}}{\text{segundo}} \right)$

Finalmente se hace notar, como curiosidad, que la intensidad de corriente eléctrica no es una magnitud intensiva, sino extensiva, a pesar de su nombre.

<sup>15</sup> James Clerk Maxwell (1831-1879), físico escocés, fue uno de los más grandes científicos que han vivido. A él se le debe uno de los descubrimientos más importante de nuestra época: la teoría del electromagnetismo. También hizo contribuciones fundamentales a las matemáticas, la astronomía y la ingeniería.

## 1.4.2 Características de los instrumentos de medición.<sup>16</sup>

Los instrumentos de medición hacen posible la observación de los fenómenos eléctricos y su cuantificación. Ahora bien, estos instrumentos tienen una serie de limitaciones que debemos tomar en cuenta para evaluar si afectan de alguna manera las medidas que se están realizando, y poder determinar la veracidad de los resultados. Las características más importantes que definen el comportamiento de los instrumentos son las siguientes:

### 1.4.2.1 Exactitud, error y precisión.

La exactitud y la precisión son conceptos muy importantes en metrología, con significados diferentes y bien definidos, aunque en el lenguaje común se utilicen habitualmente como sinónimos. Además, exactitud y error son conceptos complementarios, por ello una medición puede ser precisa y, al mismo tiempo, inexacta. Es decir, a la mayor presencia de uno, menor del otro.

Así, la exactitud viene definida como **la proximidad** entre el valor medido y el valor “verdadero” de lo que se está midiendo. Así pues, una medición es más exacta cuanto más pequeña es esa diferencia entre ambos valores (que define el concepto de **error de la medida**).

El Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) define la **precisión** como la proximidad en las indicaciones o valores medidos de un grupo de mediciones realizadas sobre una misma dimensión y con el mismo instrumento.

La precisión de una medida suele expresarse estadísticamente mediante medidas de dispersión tales como la desviación típica o la varianza. Por ello, cuanto más estrecha sea la distribución de resultados, menor será la desviación típica de la misma y mayor la precisión de la medida. **La precisión depende pues únicamente de la distribución de los resultados** y no está relacionada con el valor convencionalmente “verdadero” de la medición (o sea, la exactitud).

Por ejemplo, en el juego de lanzamiento de dardos<sup>17</sup> sobre un blanco circular pueden darse los tres resultados siguientes, juzgados bajo los conceptos de exactitud y precisión.



Figura 1.4.2 Precisión.

Se puede analizar este otro ejemplo para explicar la diferencia entre exactitud y precisión. Supóngase que se tienen dos relojes digitales como los de la Fig. 1.4.3, que en un momento dado, (a) indica las 02 horas, 15 minutos, 30 segundos, 3 décimas, 4 centésimas. En tanto, (b) indica 02 horas, 31 minutos.

<sup>16</sup> Se consultó el *Vocabulario Internacional de Metrología (VIM)*. Documento publicado por el Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM). <http://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>.

<sup>17</sup> Los **dardos** son un juego que se practica individualmente o por equipos, y que consiste en lanzar tres o más dardos sobre un blanco circular (o una diana).

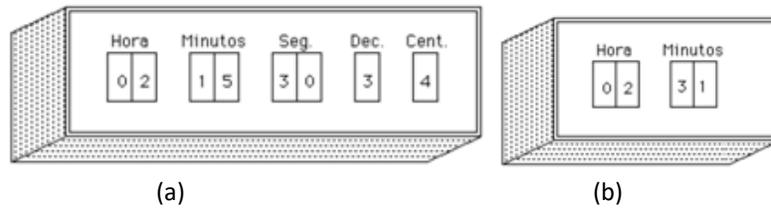


Fig. 1.4.3 Medición de tiempo con dos cronómetros de características diferentes.

Si el tiempo indicado por el reloj mundial es el indicado en la figura 1.4.4.



Fig. 1.4.4 Hora intencional

Con la aplicación correcta de los conceptos de exactitud y precisión, se determina que el reloj de la fig. 1.4.3(a) no está indicando el tiempo con exactitud, aunque estén muy bien definidas lecturas hasta centésimas de segundo. Es un reloj preciso, pero no exacto.

En cambio el reloj de la figura 1.4.3 (b) está indicando la hora exactamente, aunque solo se pueden definir lecturas hasta de minutos. Es un reloj exacto, pero no preciso.

La *precisión* tiene también referencia con el grado de conformidad esperada de la medición. Por ejemplo, la precisión de un reloj que puede indicar hasta segundos puede ser suficiente para una persona común, pero no a un juez de una competencia deportiva.

**Ejemplo 1.4.2.** ¿Cuál es el error si un voltímetro da una lectura de 10,1 V cuando el valor verdadero es de 10,5V?

**Respuesta.** Ya fue expuesto que la exactitud se determina en función del error. O de otra forma, el error se define como la diferencia entre el valor indicado y el verdadero, el cual está dado por un elemento patrón.

El error es la diferencia entre los valores medido y verdadero [ecuación (1)]. Por tanto

$$\text{Error} = \text{Valor verdadero o real} - \text{Valor medido} \quad (1)$$

$$\text{error} = 10.5 - 10.1 = 0.4 \text{ V}$$

El error puede ser indicado como **error fraccional**, es decir, el error como una fracción del valor real:

$$\text{error fraccional} = \frac{\text{valor real} - \text{valor medido}}{\text{valor real}}$$

O como porcentaje del error fraccional

$$\text{porcentaje de error fraccional} = \frac{\text{valor real} - \text{valor medido}}{\text{valor real}} \times 100\%$$

### 1.4.2.2 Fuentes de error.

En general, los errores pueden ser clasificados como errores aleatorios, sistemáticos y errores humanos. Los *errores aleatorios* son aquellos que ocurren de forma impredecible entre lecturas sucesivas de la misma cantidad, variando en magnitud y siendo positivos o negativos.

Los *errores sistemáticos* son errores que permanecen constantes con repetidas medidas. Los *errores de calibración* están en este grupo. Una incorrecta calibración da por resultado, por ejemplo, que el instrumento tenga una lectura más alta o más baja en toda la escala.

Los *errores humanos* son fallos realizados por las personas al utilizar los instrumentos y tomar las lecturas. Una medida es más *exacta* cuando los errores aleatorios, sistemáticos y humanos son pequeños. Los *errores humanos* más comunes:

- *Errores de lectura.* El operador realiza una lectura incorrecta de un valor o de la escala.
- *Errores de cálculo.* El operador realiza un fallo en la realización de un cálculo.
- *Instrumento incorrecto.* El operador elige un instrumento o método de medida incorrecto y, así, obtiene unos resultados falsos. Por ejemplo, un instrumento usado en la medida de diferencia de potencial (voltaje) de una señal que tiene una frecuencia mayor que la del margen de utilización indicada del instrumento. El resultado puede ser una lectura errónea.
- *Ajuste incorrecto.* El operador ajusta incorrectamente alguna función del sistema de medida: por ejemplo, puesta a punto incorrecta de la condición de equilibrio en un puente o ajuste a cero en un galvanómetro.<sup>18</sup>

### 1.4.2.3 Rango.

Es el conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de medición de un instrumento. Diferencia entre el valor máximo ( $X_M$ ) y el valor mínimo ( $X_m$ ) de la capacidad de medida del instrumento. Por ejemplo: el primer rango de medida del instrumento de medición de voltaje mostrado en la figura 1.4.1 es de 0-250 V.

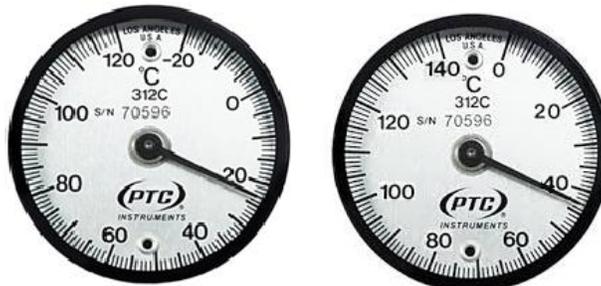


Figura 1.4.1 Rangos diferentes de un instrumento.

### 1.4.2.4 Alcance (span).

Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del rango de medida del instrumento. En el instrumento de medición de la figura 1.4.1, el valor del alcance es de 250 V.

Los conceptos de rango y alcance pueden confundirse. Por ejemplo, se tienen dos termómetros que presentan igual alcance ( $120^{\circ} - (-20^{\circ}) = 240^{\circ} - 0^{\circ} = 140^{\circ} \text{ C}$ ), pero diferentes rangos:



Dos instrumentos de medición con diferente rango pueden tener igual alcance

<sup>18</sup> Un **galvanómetro** es un instrumento básico para detectar y medir la corriente eléctrica. Como se explicará posteriormente, se trata de un instrumento analógico electromecánico que produce la rotación de una aguja o puntero en respuesta a la corriente eléctrica que fluye a través de su interior.

#### 1.4.2.5 Fiabilidad.

Medida de la probabilidad de que un instrumento continúe comportándose dentro de límites de tolerancia especificados de error a lo largo de un tiempo determinado y bajo condiciones especificadas.

#### 1.4.2.6 Linealidad.

Esta cualidad del instrumento es muy deseable y necesaria ya que implica una sensibilidad similar en todo el rango de medida. Indica en qué grado la característica entrada-salida del instrumento tiene la misma proporcionalidad y se puede aproximar a una línea recta.

**Ejemplo 1.4.2.** Se tiene un sensor de temperatura con una característica ideal de linealidad indicada en la figura 2.3.

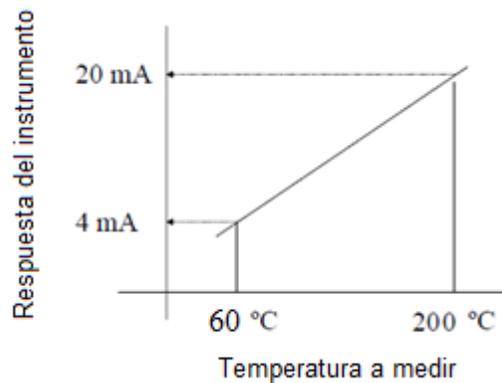


Figura 2.3 Grafica ideal de respuesta de un sensor de temperatura.

Determinar: a) Rango, b) El alcance, c) la sensibilidad, y de la ecuación de la recta de funcionamiento.

a) Rango:  $60 - 200 \text{ } ^\circ\text{C}$

b) Alcance (span):  $200 - 60 = 140 \text{ } ^\circ\text{C}$

c) Al determinar la ecuación de la recta de respuesta del funcionamiento del medidor de temperatura que pasa por los puntos  $P_1 = (60^\circ\text{C}, 4 \text{ mA})$  y  $P_2 = (200^\circ\text{C}, 20 \text{ mA})$ , la cual tiene la forma

$$y - y_1 (\text{mA}) = m * (x - x_1) (^\circ\text{C})$$

donde

$$m = \frac{y_2 - y_1 (\text{mA})}{x_2 - x_1 (^\circ\text{C})} = \frac{20 - 4 (\text{mA})}{(200 - 60) (^\circ\text{C})} = 0.1143 \frac{\text{mA}}{^\circ\text{C}}, \text{ es la pendiente de la recta.}$$

(En este caso la pendiente de la recta determina la sensibilidad del instrumento).

$$S = 0.1143 \frac{\text{mA}}{^\circ\text{C}}$$

$$d) (y - 4) (\text{mA}) = \frac{[20 - 4] (\text{mA})}{(200 - 60) (^\circ\text{C})} * (x - 60) (^\circ\text{C})$$

$$(y - 4) (\text{mA}) = [0.1143 * (x - 60)] (\text{mA})$$

$$y (\text{mA}) = (0.1143 * x - 2.858) (\text{mA})$$

#### 1.4.2.7 Sensibilidad.

La sensibilidad de un instrumento es la relación entre la variación o incremento del desplazamiento señalado por el indicador y el cambio en la cantidad de la dimensión a medir que produce esta variación. Se puede expresar como:

$$\text{sensibilidad} = \frac{\text{cambio en el desplazamiento del indicador del instrumento}}{\text{cambio en la cantidad de la magnitud a medir}}$$

Por ejemplo, en el caso de un osciloscopio analógico, la sensibilidad en la escala Y (amplitud) puede estar indicada como 0.5 div/V. Lo anterior indica que por cada mitad de desviación del haz lo provoca un voltio de señal de entrada.

En el caso de algunos sistemas de medida, por ejemplo, un puente, esta definición se expresa en términos de cambio en la salida resultante de una *variación* a la entrada,

$$\text{sensibilidad} = \frac{\text{cambio en la salida}}{\text{cambio en la entrada}}$$

Para un miliamperímetro: la sensibilidad viene dada por el número de divisiones de desviación cuando por él circula la corriente de 1 mA. Las unidades de este parámetro son div/mA. Si se considera el caso de dos miliamperímetros que tienen el mismo número de divisiones en su escala, pero en uno se da una deflexión de dos divisiones cuando circula 1 mA, mientras que el segundo deflexiona 10 divisiones para la misma corriente. Con base a lo anterior, se concluye que el segundo miliamperímetro es mucho más sensible que el primero.

Para un voltímetro: la sensibilidad vendría dada por el número de divisiones deflexionadas cuando en sus extremos hay una diferencia de potencial de 1 V. Sin embargo, para los voltímetros se define un parámetro especial que se llama característica de sensibilidad, la cual viene expresada en ohm por volt. La definición de este parámetro y su utilidad se deberá explicar cuando se estudie el voltímetro.

#### 1.4.2.8 Resolución.

Resolución o discriminación de un instrumento es el menor incremento en la cantidad medida que puede ser detectada con certeza o que produce un cambio observable en la lectura del instrumento. O también, es el menor cambio en la entrada que se puede medir. La resolución puede ser expresada en unidades de la variable medida o en porcentaje de resolución fraccional de la escala total, del alcance, etc.

Así, por ejemplo, un voltímetro puede tener una resolución fraccional de  $10^{-4}$ . Esto quiere decir que en una escala de 200 V la resolución podrá ser de  $200 \times 10^{-4}$  V o 20 mV. Interpretando lo anterior de otra forma, ese voltímetro puede registrar lecturas hasta 20 mV como mínimo.

#### 1.4.3 Los métodos de medida.

Prácticamente al realizar alguna actividad relacionada con la medición, debe aplicarse uno o diferentes métodos de medición. Los métodos, para ser técnicamente válidos, se basan y desarrollan en principios de medición o fundamentos científicos que dan el respaldo teórico y experimental de los mismos. Las normas oficiales exigen que los certificados, reportes o informes de resultados de mediciones, deban incluir la identificación del método de medición utilizado.

Para iniciar, se puede decir que se tienen dos tipos de métodos de medición: las mediciones directas e indirectas.

### ❖ Mediciones directas

Son aquéllas en las cuales el resultado es obtenido directamente del indicador del instrumento que se está utilizando. Por ejemplo, Figura 1.3.1 muestra que para medir la corriente eléctrica por un circuito podemos utilizar el amperímetro apropiado.

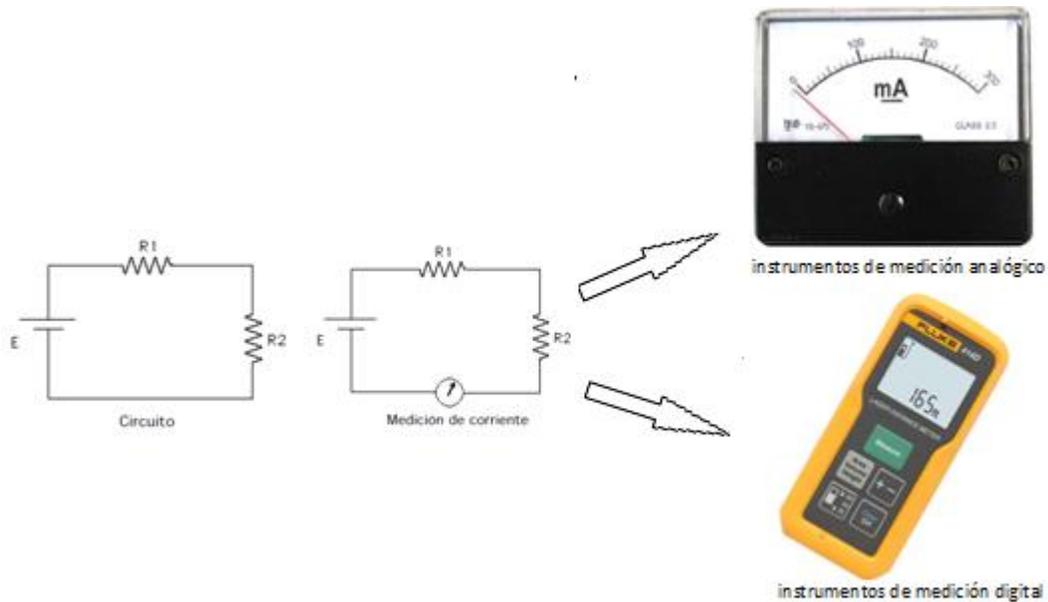
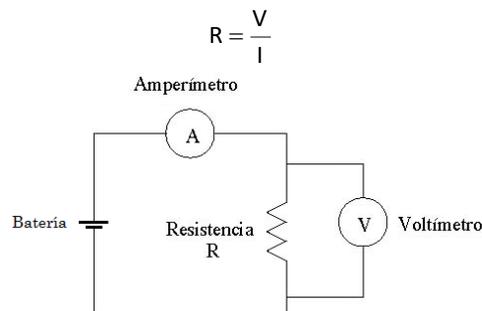


Figura 1.3.1 Método directo.

### ❖ Mediciones indirectas

Son aquéllas en que las cuales el resultado deseado no se obtiene directamente de las lecturas realizadas con los instrumentos utilizados, sino que es necesario obtener el valor de ciertas magnitudes para hallar la cantidad deseada mediante algunos cálculos. Por ejemplo, el valor de una resistencia lo podemos determinar de la siguiente forma:

Por ejemplo, se puede determinar el valor desconocido de una resistencia R mediante la utilización de ley de Ohm, que establece una relación lineal entre la diferencia de potencial (voltaje) aplicado entre los extremos de la resistencia y la corriente eléctrica que circula a través de ella, de forma que se cumple:



Circuito eléctrico para la medición indirecta de la resistencia R.

Con un amperímetro se mide la corriente eléctrica que circula por ella, y con un voltímetro la diferencia de potencial (o caída de voltaje) entre sus terminales que produce la circulación de la corriente medida anteriormente. Con estas dos lecturas se calcula la resistencia aplicando la ley de Ohm.

El método de medición directa se puede realizar usando instrumentos de deflexión (o analógica) o digital.

### ❖ Instrumentación de deflexión.

La deflexión de la aguja del instrumento da directamente la medida. Por ejemplo: en el circuito mostrado en la Fig. 1.3.1, para medir la corriente eléctrica que circula en él se usa un amperímetro, como se indica. El instrumento analógico indica una deflexión, y se puede obtener la medición de la corriente que circula por el circuito.

Los instrumentos analógicos han sido reemplazados casi totalmente por instrumentos digitales. Como consecuencia es inadecuado llamar de deflexión a este método cuando se usa un indicador digital, aunque sigue su misma esencia, la indicación digital es proporcional a la existencia de la magnitud a medir.

### ❖ Método de detección de cero.<sup>19</sup>

En el método de cero, la indicación nula o cero del instrumento sensor<sup>20</sup> lleva a determinar la medición que se busca, a partir de otros datos conocidos. Por ejemplo, en la Fig. 1.3.2 se muestra un circuito denominado puente de Wheatstone, que se utiliza para medir el valor de una de las resistencias, si se conoce el valor de las otras tres y que el medidor indique lectura cero. El puente tiene la configuración mostrada:

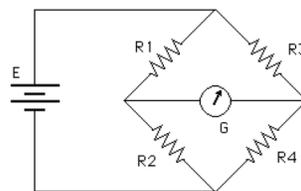


Fig. 1.3.2 Puente de Wheatstone.

Cuando en la figura 1.3.2 en el instrumento indicador o sensor indica un valor nulo, se cumple la condición

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (1)$$

Basándose en esta propiedad del circuito, es posible medir una de las resistencias. Por ejemplo, al considerar que la resistencia incógnita sea  $R_1$ . Despejando  $R_1$  de la fórmula:

$$R_1 = \frac{R_3}{R_4} R_2$$

Para  $R_2$  se utiliza una resistencia variable (se denomina potenciómetro) cuyo valor debe variarse y conociéndose en el proceso de medición, hasta lograr que el sensor indique cero. Mientras,  $R_3$  y  $R_4$  deben ser resistencias fijas y su valor previamente conocido.

Si asumimos que

$$K = \frac{R_3}{R_4}$$

entonces

$$R_1 = K \cdot R_2 \quad (3)$$

<sup>19</sup> Este método es a su vez, método de medición indirecta.

<sup>20</sup> El sensor puede ser digital o analógico.

Resumen del método: Para medir una resistencia incógnita, se coloca dicha resistencia en la posición  $R_1$  y se varía  $R_2$  hasta obtener **una lectura de cero** en el instrumento indicador. En ese momento se cumple la ecuación indicada en la Ec. (3), por lo que el valor de  $R_1$  será igual al valor de la constante  $K$  multiplicada por  $R_2$ .

Debe observarse que el método de detección de cero no necesita la circulación de una corriente por el instrumento indicador. Debido a lo anterior, el método de detección de cero puede ofrecer mayor exactitud que el de deflexión, pero éste último permite la medición mucho más rápidamente y por lo tanto, es de mayor utilidad cuando la exactitud requerida no es muy alta.

## 1.5 SISTEMAS<sup>21</sup> DE UNIDADES Y PATRONES.

Un problema central de la metrología es determinar con precisión y exactitud, claridad y legalidad a la unidad de la magnitud a medir. Este problema es, en resumen, determinar internacionalmente la **unidad patrón<sup>22</sup> de la magnitud**. Esta tarea ha sido compleja ya que involucra muchos aspectos de la actividad humana que van desde aplicaciones prácticas y científicas hasta cuestiones políticas, sociales, económicas, legales, e históricas. Ha sucedido que cada persona, cada pueblo, en cada país se medía con instrumentos y referencias o patrones de medición naturales. Todas estas unidades de medida resultaban ambiguas, ya que variaban de individuo a individuo y de un lugar a otro, lo que comenzó a crear dificultades a la hora de establecer las primeras relaciones comerciales entre regiones o países.

A pesar que la problemática para establecer las unidades de medición patrón ha evolucionado, su desarrollo ha llevado a determinar que sólo son necesarias tres magnitudes fundamentales para el estudio de los sistemas físicos mecánicos. Las magnitudes fundamentales mecánicas son: la *longitud*, la *masa* y el *tiempo*. Para estudiar los fenómenos de la termodinámica se necesitan dos magnitudes fundamentales más, estas son *cantidad de materia* y *temperatura*; para el estudio de la electricidad es necesario introducir otra magnitud fundamental, la *intensidad de corriente eléctrica*, (aunque en otros momentos, se tomó como magnitud fundamental la *carga eléctrica*); con la inclusión de la fotometría como rama de la física, resultó necesario introducir una séptima magnitud fundamental, que es la *intensidad luminosa*.

Debido a que el mundo científico, industrial y comercial ha buscado un solo sistema de unidades que resulte práctico, claro y de acuerdo con los avances de la ciencia, en 1960 científicos y técnicos de todo el mundo se reunieron en Ginebra, Suiza y acordaron constituir el Sistema Internacional de Unidades (SI). A continuación se hace un breve recorrido histórico de algunos sistemas de medidas anteriores que sirven de base al actual sistema de medidas, el SI.

### 1.5.1 Orígenes del sistema métrico actual.

#### 1.5.1.1 Gabriel Mouton (1670).

En la segunda mitad del siglo XVII la astronomía y la geodesia habían adquirido un notable desarrollo, habiéndose medido la longitud del arco del meridiano terrestre en varios lugares de la Tierra (El meridiano es una circunferencia que pasa por ambos polos), y además, se conocía la longitud del radio terrestre.

En 1670 Gabriel Mouton, recomendó la adopción una referencia estándar para la medición de longitudes basado en mediciones de la circunferencia de la Tierra. Sus propuestas influyeron fuertemente en la adopción del sistema métrico decimal francés de 1791.

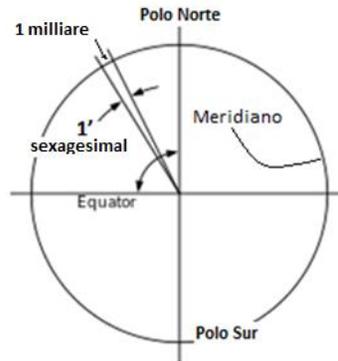
---

<sup>21</sup> La palabra "**sistema**" se define como "Conjunto de objetos que relacionadas entre sí mediante reglas, leyes o principios contribuyen a lograr un fin"; de ahí que, un "sistema métrico decimal" se puede definir como "el conjunto de unidades **estandarizadas o patrones** de medida con las que se pueden medir magnitudes de una misma naturaleza usando valores (escalas) mayores o menores que la unidad principal de cada clase en potencias de base 10".

<sup>22</sup> Un **patrón** de medida puede ser un instrumento, una medida materializada o un material de referencia que permiten definir en forma simple y precisa una unidad de medida. Por ejemplo, la unidad de la magnitud "masa", en su forma materializada, es un cilindro de metal de 1kg. Un calibrador representa ciertos valores de la magnitud "longitud". Son bloques de acero endurecido que tienen dos superficies planas y paralelas con la distancia paralela entre las superficies, marcadas para garantizar una precisión de unos pocos millonésimos de una pulgada, usados en procesos industriales como un patrón exacto de medición.

### 1.5.1.2 La determinación de milla náutica.

Su sugerencia fue la *milliare* (actualmente milla náutica<sup>23</sup>), que la definió como la longitud de arco sobre un arco de meridiano terrestre que abarcaba un minuto de latitud.



Si se sabe que la longitud del radio terrestre =  $6.37 \cdot 10^6$  m;  
 Por lo tanto, la longitud del meridiano terrestre =  $2\pi \cdot r = 2\pi \cdot 6.37 \cdot 10^6 = 40.023984 \cdot 10^6$  m  
 Longitud del arco del Ecuador al Polo Norte = meridiano/4 =  $10.006 \cdot 10^6$  m  
 El ángulo recto =  $90^\circ$ , entonces  $1^\circ = 60$  min

Considerando una regla de tres

$$\frac{1 \text{ milliare}}{1 \text{ min}} = \frac{10.006 \cdot 10^6 \text{ m}}{360^\circ}$$

$$1 \text{ milliare} = \frac{10.006 \cdot 10^6 \text{ m}}{60 \times 360 \text{ min}} \cdot 1 \text{ min (sexagesima I)}$$

$$1 \text{ milliare} = 1 \text{ milla náutica} = 1852.96 \text{ m}$$

Mouton denominó virga a una segunda referencia estándar, que correspondía a 1/1000 de una milla.

$$1 \text{ Virga} = 1.852 \text{ m}$$

Pareciera que esta idea de establecer la longitud de un meridiano como referencia, nadie la rechazaría ya que esto no favorecía a ningún país, nación ni rey. La idea parecía muy sencilla, pero no se impuso de inmediato. Hubieron de pasar más de cien años para que la idea fuera tomada por los franceses, aunque con un cambio: la medida de ángulos sería decimal.

### 1.5.1.3 El Sistema Métrico Decimal francés. (1799).

El químico francés, Henry Antoine de Lavoisier, dijo, refiriéndose al sistema propuesto para la unificación de las medidas:  
 “... nada más grande ni más sublime ha salido de las manos del hombre que el Sistema Métrico Decimal”

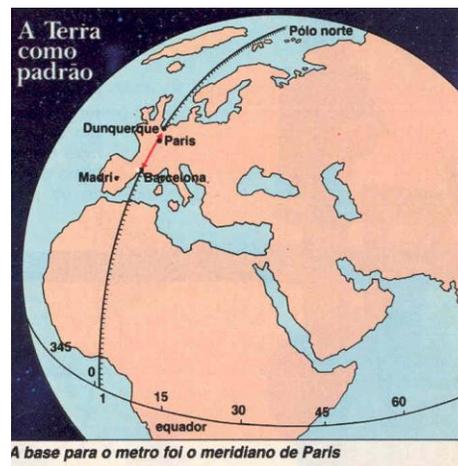
El sistema métrico decimal es una de las contribuciones más importantes que la revolución francesa hizo al mundo; es símbolo de los principios que fundamentaron la revolución: *libertad, igualdad y fraternidad*. La situación francesa previa a este movimiento político-social, era de confusión absoluta, especialmente injusta con las clases populares, desprotegidas frente al capricho de quienes podían imponer los patrones de medida.

Tras suprimir la Revolución Francesa los derechos feudales<sup>24</sup> referentes a pesas y medidas (el 15 de marzo de 1790), se propuso instaurar un sistema de medidas único y uniforme, basado en el *uso exclusivo de la escala decimal*, asegurando así la facilidad en los intercambios y la integridad en las operaciones comerciales.

<sup>23</sup>  $1 \text{ milla náutica} = \frac{\text{longitud del meridiano}}{4 \times 90 \times 60} = 1852 \text{ m}$

La euforia surgida por las ventajas argumentadas a favor del sistema decimal, provocó la propuesta de la medición del tiempo de forma decimal. Por esta razón, por ejemplo, fue introducido el nuevo calendario republicano francés<sup>25</sup>. Se intentó cambiar la duración del día al sistema decimal, es decir, días de diez horas; el calendario republicano con meses de 30 días y tres décadas de diez días (no deberían haber semanas). La razón principal para que no prosperase el cambio fue que este modelo no se acercaba a los ya utilizados antes (como el calendario gregoriano<sup>26</sup>, por ejemplo). El sistema métrico francés también definía una unidad de base decimal para la medida de ángulos, en el cual el ángulo recto se divide en 100 partes, llamadas un gon o un grad.

La Academia de Ciencias francesa<sup>27</sup> determinó, en marzo de 1791, que el meridiano terrestre<sup>28</sup> se convirtiera en la referencia geográfica para determinar la unidad estándar o patrón de longitud. El primer paso fue determinar la longitud del arco del meridiano terrestre que abarca un minuto decimal de latitud.<sup>29</sup>



En 1791, el sistema métrico francés definió una unidad de base decimal para la medida de ángulos, en la cual el ángulo recto se divide en 100 partes, llamadas un gon o un grad. A partir de esta unidad angular se define la longitud de un arco del meridiano correspondiente a un ángulo de 1' decimal.

<sup>24</sup> Se denomina feudalismo a la forma especial de organización social de los países europeos, durante la Edad Media, que surge a causa de la debilidad de los reyes; consistió en la aparición de dos grandes clases: los señores (la nobleza) y los vasallos. Para asegurarse la lealtad de los nobles, los monarcas se vieron obligados a cederle gran parte de su autoridad a la nobleza para obtener su apoyo. De esta forma, los señores recibieron grandes extensiones de tierras denominadas feudos, donde ejercieron dominio total, político y social.

<sup>25</sup> Los nombres de los meses fueron: Vendimiario ('vendimia'), Brumario ('bruma'), Frimario ('escarcha'), Nivoso ('nevado'), Pluvioso ('lluvioso'), Ventoso ('ventoso'), Germinal ('semilla'), Floreal ('flor'), Pradial ('pradera'), Mesidor ('cosecha'), Termidor ('calor'), Fructidor ('fruta'). Fue abolido en 1806 debido a dos fallos fundamentales de su diseño: las fechas se contaban a partir del día de la proclamación de la Primera República Francesa (21 de septiembre de 1792), y que los nombres de los meses se basaban en eventos puramente locales como brumaire (brumoso) o nivose (nevado); condiciones locales que no se daban ni siquiera en la totalidad del territorio francés.

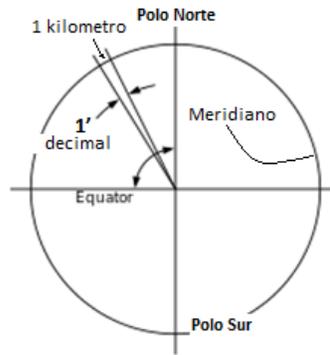
<sup>26</sup> Es el calendario originario de Europa, actualmente utilizado de manera oficial en casi todo el mundo. Así denominado por haber sido promovido por el Papa Gregorio XIII.

<sup>27</sup> Creada en 1666, durante el reinado de Luis XIV, contó inicialmente con científicos como René Descartes, Blaise Pascal y Pierre de Fermat. Se trata de una de las cinco academias francesas que constituyen el actual Instituto de Francia. Fue la primera institución que adoptó el sistema métrico decimal como sistema universal.

<sup>28</sup> De esta forma la definición de la unidad de longitud utilizaría una referencia más estable que las utilizadas más antiguamente, por ejemplo, en Egipto se utilizaba la vara basada en la medida del antebrazo del faraón. En algunos reinos de la Europa medieval, el patrón de longitud era la dimensión del pie del rey de turno.

<sup>29</sup> <https://ingenieriademapas.wordpress.com/category/astronomia/>

Ahora, como 1 grad = 100 min, entonces  $400 \text{ grad} = 400 \times 100 = 4 \times 10^4 \text{ min}$ . Finalmente,



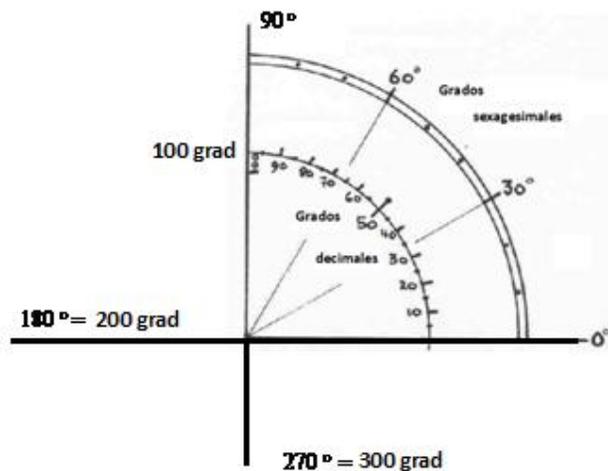
$$\frac{1 \text{ kilometro}}{1 \text{ min decimal}} = \frac{40.023984 \cdot 10^6 \text{ m}}{400^\circ}$$

$$1 \text{ kilometro} = \frac{40.023984 \cdot 10^6 \text{ m}}{400^\circ (\text{decimal})} \cdot 1 \text{ min (decimal)}$$

$$1 \text{ kilometro} = \frac{40.023984 \cdot 10^6 \text{ m}}{4 \times 10^4 \text{ min}} \cdot 1 \text{ min (decimal)}$$

$$1 \text{ kilometro} = 1000.5996 \text{ m}$$

A la milésima parte de esta medida se denominó metro (un metro a correspondía a 1/1000 de un kilómetro).



De este resultado se da la **definición de metro (en 1791) fue "la diezmillonésima parte de la longitud de un cuarto del meridiano terrestre"**.

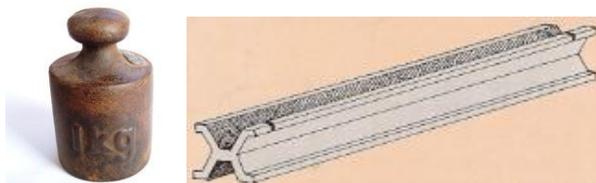
$$1 \text{ m} = \frac{\text{longitud del meridiano}}{4 \times 10 \times 10^6}$$

Esta unidad recibió el nombre de "metro" (del griego *metron*, "medida"), sus subdivisiones se denominarían con prefijos latinos (decímetro, centímetro, milímetro) y sus múltiplos, con griegos (decámetro, hectómetro, kilómetro).

#### 1.5.1.4 Unidad de peso.

La determinación de la unidad estándar de peso, denominada kilogramo la asumiría el químico **Antoine Lavoisier** (1743- 1794). Para ello, la primera definición decidida durante la Revolución francesa, especificaba que era la masa<sup>30</sup> de un decímetro cúbico (un litro) de agua destilada a una atmósfera de presión y 4 °C; para pesarla se utiliza un cilindro (un cuerpo cuyo volumen se debe conocer con precisión) y una balanza de un solo brazo (para evitar una posible desigualdad entre los brazos de una balanza convencional). Esta definición era complicada de realizarla con exactitud, sumándose que la densidad del agua depende de la presión atmosférica.

El 7 de abril de 1795 la Convención Nacional de la Revolución francesa decretó que habría un solo patrón de pesos y medidas para toda Francia e invitaba a los ciudadanos "a dar una prueba de su afecto por la unidad e indivisibilidad de la República utilizando, a partir de ahora, las nuevas medidas".



El proceso del sistema métrico culminó con el registro de los patrones del metro y el kilogramo a los Archivos de la República en junio 22 de 1799, confeccionados en aleación de platino. Este acto se realizó en presenciada de funcionarios del gobierno francés y de varios países invitados, además de muchos de los más renombrados sabios de la época. El nuevo sistema métrico decimal fue implantado obligatoriamente en Francia en 1801.

El establecimiento del sistema métrico decimal representó un esfuerzo de justificación científica para el desarrollo de la sociedad, alcanzando su legalización plena en Francia por decisión de Napoleón, en el periodo del Consulado en 1810. Sin embargo, el sistema decimal no fue muy bien aceptado en la Francia revolucionaria, por ello sus viejas unidades, entonces ilegales, se mantuvieron en uso. En febrero de 1812, Napoleón autorizó el uso de algunas medidas usuales redefiniéndolas al sistema métrico: la toesa como 2 metros, libra como 500 gramos, etc. , y tras algunos problemas más, en 1825 el sistema métrico fue oficializado de nuevo, comenzando lenta, pero constantemente su particular conquista del mundo.

Pese a la readopción oficial del sistema métrico, ni siquiera los franceses lo usaron en seguida. No fue hasta 1840 cuando el sistema métrico decimal se convirtió en el único sistema legal en Francia. En otros países el sistema métrico no fue aceptado con entusiasmo, aunque la adopción por otras naciones ocurrió constantemente después de que Francia lo hizo obligatorio.

---

<sup>30</sup> Los conceptos de masa y el peso de un objeto como nociones empíricas que no se distinguen con precisión. Fue a partir de las reflexiones de René Descartes y de Isaac Newton que se determina que conceptos científicos diferentes. La masa es una magnitud escalar que expresa la cantidad de materia de un cuerpo. No debe confundirse con el peso, que es una magnitud vectorial que expresa una fuerza. A partir del peso de un cuerpo puede conocerse su masa si se conoce el valor de la gravedad. En la Tierra, dos objetos de igual masa tienen igual peso. Un mismo objeto en la Tierra o la Luna pesaría diferente. En la 3ª. Reunión de la **Conférence Générale des Poids et Mesures** (CGPM), organismo del Sistema Internacional (SI), en 1911, se declaró que el kilogramo es la unidad de masa.

### 1.5.1.5 El Sistema Internacional de unidades (SI).

Hace prácticamente ya más de 200 años que la unidad de longitud, el metro, fue creada. Sin embargo, aun son numerosas las sociedades civiles que siguen utilizando otros patrones, aunque el metro fue cuidadosamente definido como la unidad de referencia. La fuerza de la costumbre es muy fuerte. Esta resistencia al cambio explica plenamente las palabras de M. Moureau, en su "Guía práctica para el sistema de unidades" (Ed. Technip, 1980):

«El empleo del SI trastorna los hábitos y, en el caso de las unidades, evita que errores comunes se conviertan en reglas. Las normas del SI están bien definidas. Basta aplicarlas para darse cuenta de que prevalece la lógica. El sistema propuesto [el SI] es extensible en forma indefinida; a cada nueva magnitud física se le puede asociar una unidad SI que puede ser escrita inmediatamente y sin ambigüedad... A pesar de todo [y de todos], la hora del SI ha llegado.»

### 1.5.1.6 La Convención del Metro, 1875.

El **20 Mayo de 1875** se llevó a cabo en París una reunión internacional denominada la Convención del Metro (*Convention du Mètre*). En ella, diez y siete naciones,<sup>31</sup> establecieron las siguientes tres organizaciones para dirigir las actividades internacionales relativas a uniformar el sistema de medidas:

**Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)**, una conferencia intergubernamental de delegados oficiales de las naciones miembro y autoridad suprema para todas las acciones.

**Comité International des Poids et Mesures (CIPM)**. El CIPM está constituido por 18 científicos y metrologistas de diferente nacionalidad. Propone y ejecuta decisiones de la CGPM. Es responsable de promover la uniformidad de las unidades de medida en todo el mundo, lo hace por acción directa o por medio de resoluciones de la CGPM.

**The International Bureau of Weights and Measures**, (la BIPM, Oficina Internacional de Pesas y Medidas). El BIPM trabaja bajo la supervisión exclusiva del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), que a su vez está bajo la autoridad de la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), a la cual presenta su informe sobre los trabajos efectuados por el BIPM. La misión del BIPM es asegurar la unificación mundial de las medidas; es un laboratorio permanente y centro mundial de metrología científica, cuyas actividades abarcan:

- establecer los patrones fundamentales y las escalas para la medida de las principales magnitudes físicas y conservar los prototipos internacionales;
- llevar a cabo comparaciones de los patrones nacionales e internacionales;
- asegurar la coordinación de las técnicas de medida correspondientes;
- efectuar y coordinar las mediciones de las constantes físicas fundamentales relevantes en las actividades precedentes.

Las actividades del BIPM, limitadas en un principio a las medidas de longitud y de masa y a los estudios metrológicos relacionados con estas magnitudes, se han ampliado a los patrones de medidas eléctricas (1927), de fotometría y radiometría (1937), de radiaciones ionizantes (1960), a las escalas de tiempo (1988) y a la química (2000).

En los laboratorios del BIPM trabajan alrededor de cuarenta y cinco físicos y técnicos, los cuales realizan fundamentalmente investigaciones metrológicas, comparaciones internacionales de realizaciones de unidades

---

<sup>31</sup> Al 31 de diciembre de 2005, cincuenta y un Estados eran miembros de esta Convención: África del Sur, Alemania, Argentina, Australia, Austria, Bélgica, Brasil, Bulgaria, Camerún, Canadá, Chile, China, República Checa, República de Corea, República Popular Democrática de Corea, Dinamarca, República Dominicana, Egipto, Eslovaquia, España, Estados Unidos, Finlandia, Francia, Grecia, Inglaterra, Holanda, Hungría, India, Indonesia, Irán, Irlanda, Israel, Italia, Japón, Malasia, México, Noruega, Nueva Zelanda, Paquistán, Polonia, Portugal, Rumania, Rusia, Serbia y Montenegro, Singapur, Suecia, Suiza, Tailandia, Turquía, Uruguay y Venezuela.

y calibraciones de patrones. Estos trabajos son objeto de un informe anual detallado que se publica en el *Informe del Director sobre la actividad y gestión de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas*.

Ante la amplitud de las tareas confiadas al BIPM, en 1927 el CIPM estableció órganos, conocidos como Comités Consultivos, destinados a informar sobre las cuestiones que se les sometían a consideración, para su estudio. Estos Comités Consultivos, que pueden a su vez formar grupos de trabajo, temporales o permanentes, para el estudio de cuestiones concretas, son responsables de coordinar los trabajos internacionales en sus respectivos campos y de proponer al CIPM recomendaciones referentes a las unidades.

El presidente de cada Comité Consultivo es nombrado por el CIPM y suele ser miembro del CIPM. Los miembros de los Comités Consultivos son laboratorios de metrología e institutos especializados, aceptados por acuerdo del CIPM, los cuales envían delegados elegidos por ellos. También hay miembros a título personal designados por el CIPM y un representante del BIPM. En la actualidad hay diez Comités:

1. Comité Consultivo de Electricidad y Magnetismo (CEEM), nuevo nombre dado en 1997 al Comité Consultivo de Electricidad (CCE) creado en 1927;
2. Comité Consultivo de Fotometría y Radiometría (CCPR), nuevo nombre dado en 1971 al Comité Consultivo de Fotometría (CCP) creado en 1933 (de 1930 a 1933 el CCE se ocupó de la fotometría);
3. Comité Consultivo de Termometría (CCT), creado en 1937;
4. Comité Consultivo de Longitud (CCL), nuevo nombre dado en 1997 al Comité Consultivo para la Definición del Metro (CCDM), creado en 1952;
5. Comité Consultivo de Tiempo y Frecuencia (CCTF), nuevo nombre dado en 1997 al Comité Consultivo para la definición del Segundo (CCDS) creado en 1956;
6. Comité Consultivo de Radiaciones Ionizantes (CCRI), nuevo nombre dado en 1997 al Comité Consultivo para los Patrones de Medida de Radiaciones Ionizantes (CCEMRI) creado en 1958 (en 1969 este Comité Consultivo estableció cuatro secciones: Sección I (Rayos X y  $\gamma$ , electrones), Sección II (Medida de radionucléidos), Sección III (Medida de Neutrones), Sección IV (Patrones de energía  $\alpha$ ); esta última sección fue disuelta en 1975, siendo confiado su campo de actividad a la Sección II);
7. Comité Consultivo de Unidades (CCU), creado en 1964 (este Comité Consultivo sustituyó a la "Comisión para el Sistema de Unidades" creada por el CIPM en 1954);
8. Comité Consultivo para la Masa y las Magnitudes Relacionadas (CCM), creado en 1980;
9. Comité Consultivo para la Cantidad de Sustancia: metrología en la química (CCQM), creado en 1993;
10. Comité Consultivo de Acústica, Ultrasonidos y Vibraciones (CCAUV), creado en 1999.

### 1.5.1.7 Reuniones de la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) y sus decisiones más importantes.

Número de Reunion	Año	Decisiones.
1a	1889	Sanción de los prototipos del metro y el kilogramo
3a	1901	1.- Definición de la unidad de volumen denominada "litro". 2.- Declaración que el kilogramo es la unidad de masa. La palabra "peso" es una cantidad de la misma naturaleza que "fuerza". El valor de la aceleración debida a la gravedad $g_n$ es $980.665 \text{ cm/s}^2$
7a	1927	Definición del metro de acuerdo al prototipo internacional
8a	1933	Sustitución de las unidades eléctricas absolutas llama unidades "internacionales"
9a	1948	1.- Se propone establecer un sistema práctico de unidades de medición adecuado a todos los países adheridos a la Metre Convention. 2.- Reglas cómo escribir e imprimir los símbolos de unidades y números.
10a	1954	1. Se acuerda las seis unidades base sobre las que se establece un sistema práctico de medición para uso internacional. 2. Se define la escala de temperatura termodinámica de tal modo que el punto triple del agua es $273,16$ grados Kelvin. 3. Definición de la atmosfera estándar.
11a	1960	Se decide: 1. Que el sistema fundamentado sobre las seis unidades base aprobado en 10a. Convención del CGPM, se llame "Sistema Internacional de Medidas"; 2. Que la abreviatura internacional del nombre del sistema es SI; 3. Los nombres de los múltiplos y submúltiplos y por medio de qué prefijos estarán formados. 4. Ratifica la definición del segundo dada por el CIPM en 1956: "El segundo es la fracción $1/31\ 556\ 925,9747$ del año trópico para enero de 1900, de 0 a 12 h del Tiempo de Efemérides." 6. Redefinición del metro mediante la radiación del kriptón 86. 5. Requiere al CIPM para que informe sobre la diferencia entre el decímetro cúbico y el litro
12a	1964	1. Autoriza al CIPM para investigar sobre patrones de frecuencia atómicos y moleculares 2. Deroga la definición anterior del litro y recomienda utilizar el litro como nombre especial para el decímetro cúbico 3. Acepta que continúe el uso del curie como unidad no SI 4. Decide añadir femto y atto a la lista de prefijos
13a	1967	1. Define el segundo en términos de la transición del cesio 2. Acerca de la unidad SI de temperatura termodinámica (kelvin): <ul style="list-style-type: none"> <li>la unidad de temperatura termodinámica se denota con el nombre "kelvin" y su símbolo es "K";</li> <li>este mismo nombre y este mismo símbolo se utilizan para expresar un intervalo de temperatura;</li> <li>un intervalo de temperatura puede expresarse también en grados Celsius;</li> </ul> 3. Definición de la unidad SI de la temperatura termodinámica (kelvin): Decide expresar esta definición de la forma siguiente: "El kelvin, unidad de temperatura termodinámica, es la fracción

		<p>1/273,16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.” decide la definición formal del kelvin, símbolo K</p> <p>4. Define la candela, símbolo cd, en función del cuerpo negro</p> <p>5. Nuevas unidades derivadas: número de onda, entropía, capacidad calorífica específica, conductividad térmica, intensidad radiante, y actividad (de una fuente radioactiva).</p> <p>6. Eliminar de la Resolución 7 de la 9ª Conferencia:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• el nombre de la unidad “micrón” y el símbolo “<math>\mu</math>” que se atribuyó a esta unidad y que ha pasado a ser un prefijo;</li> <li>• el nombre de la unidad “nueva candela”.</li> </ul>
14a	1971	<p>1. Se adoptan los nombres especiales “pascal” (símbolo Pa) para la unidad SI newton por metro cuadrado y “siemens” (símbolo S) para la unidad SI de conductancia eléctrica [ohmio a la menos uno].</p> <p>2. Tiempo Atómico Internacional; misión del CIPM</p> <p>3. El mol es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en 0,012 kilogramos de carbono 12; su símbolo es “mol”. El mol es una unidad básica del Sistema Internacional de Unidades.</p>
15a	1975	<p>1. Recomienda el uso del valor que resulta para la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío <math>c = 299\,792\,458</math> metros por segundo</p> <p>2. Constata que el Tiempo Universal Coordinado es la base de la hora civil cuyo uso está legalizado en la mayoría de los países, y estima que este uso es perfectamente recomendable.</p> <p>3. adopta Unidades SI para las radiaciones ionizantes (becquerel, símbolo Bq) y (gray, símbolo Gy)</p> <p>Decide añadir dos prefijos: peta and exa</p>
16a	1979	<p>1. Decide: La candela es la intensidad luminosa, en una dirección determinada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia <math>540 \times 10^{12}</math> hercios y cuya intensidad radiante en dicha dirección es 1/683 vatios por estereorradián.</p> <p>2. Decide, como excepción, adoptar los dos símbolos l y L como símbolos utilizables para la unidad litro.</p>
17a	1983	<p>Decide : El metro es la longitud del trayecto recorrido en el vacío por la luz durante un intervalo de tiempo de 1/299 792 458 de segundo,</p>
18a	1987	<p>1. Recomienda a las instituciones nacionales que se ocupan del Tiempo Atómico Internacional buscar la colaboración de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas para la creación y mejora del Tiempo Atómico Internacional.</p> <p>2. Recomienda que los organismos nacionales e internacionales responsables apoyen a los experimentos a través de enlaces de telecomunicaciones por satélite como parte de la generación del Tiempo Atómico Internacional.</p>
19a	1991	<p>Se agregan prefijos zetta, zepto, yotta and yocto</p>
20a	1995	<p>1. La necesidad de utilizar las unidades SI en los estudios de recursos de la Tierra, el medio ambiente, el bienestar humano y cuestiones relacionadas.</p> <p>2. Que los laboratorios nacionales de metrología, en colaboración con la BIPM, se aseguren de que las comparaciones necesarias entre las normas nacionales se llevan a cabo en número suficiente</p>

		<p>para demostrar la trazabilidad internacional de las normas de medición.</p> <p>3. Invita a los laboratorios nacionales de metrología, organizaciones nacionales, regionales e internacionales que reúnan a especialistas en medición en química para colaborar con el Comité Internacional y el nuevo Comité Consultivo a establecer la trazabilidad en todo el mundo al más alto nivel para mediciones en química.</p> <p>4. interpretar las unidades suplementarias en el S.I, a saber: el radián y el estereorradián, como unidades derivadas adimensionales, y, en consecuencia, eliminar la clase de unidades suplementarias como una clase aparte en el SI.</p>
21a	1999	<p>1. Recomienda que los laboratorios nacionales continúen sus esfuerzos para perfeccionar los experimentos que vinculan la unidad de masa a constantes atómicas o fundamentales con miras a una futura redefinición del kilogramo.</p> <p>2. Colaborar con las uniones científicas y organizaciones internacionales interesadas en el establecimiento de una adecuada infraestructura de medición internacional para garantizar la trazabilidad del SI en las mediciones en biotecnología.</p> <p>3. Reconocimiento mutuo de normas nacionales de medición y de calibración y certificados de medición expedidos por los institutos nacionales de Metrología.</p> <p>4. Decide adoptar el nombre especial katal, símbolo kat, para la unidad SI mole por segundo para expresar la actividad catalítica, especialmente en los campos de la medicina y bioquímica,</p>
24a	2011	<p>Recomienda que se apruebe el ITRS (International Terrestrial Reference System), definido por la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG) y realizado por la IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), como único sistema de referencia internacional para los marcos de referencia terrestre para todas las aplicaciones metrológicas</p>

### 1.5.2. Las unidades básicas.

Como se muestra en la tabla anterior, por acuerdo de la 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), en 1960, el SI se fundamenta sobre las siete magnitudes y unidades base:

Las magnitudes básicas empleadas en el SI son longitud, masa, tiempo, intensidad de corriente eléctrica, temperatura termodinámica, cantidad de sustancia e intensidad luminosa. Las magnitudes básicas se consideran independientes, por convención. Las unidades básicas correspondientes del SI, elegidas por la CGPM, son el metro, el kilogramo, el segundo, el amperio, el kelvin, el mol y la candela.

Magnitud básicas		Unidad SI.	
Nombre	Símbolo	Nombre	Símbolo
longitud	$l, x, r, \text{etc.}$	metro	m
masa	$m$	kilogramo	kg
tiempo	$t$	segundo	s
intensidad de corriente eléctrica	$I, i$	amper	A
temperatura termodinámica	$T$	grado Kelvin	K
cantidad de sustancia	$n$	mol	mol
intensidad luminosa	$I_v$	candela	cd

Tabla 2.1. Unidades básicas del SI

### 1.5.3 Definiciones de las unidades básicas.

#### a) Unidad de longitud. El metro.

La 17ª CGPM (1983) estableció la definición actual:

**El metro es la longitud de la trayectoria recorrida en el vacío por la luz durante un tiempo de 1/299 792 458 de segundo.**

#### b) Unidad de masa. El kilogramo.

El prototipo internacional del kilogramo, es un patrón materializado fabricado en platino iridiado, se conserva en el BIPM en las condiciones establecidas por la 1ª CGPM en 1889 que aprobó este prototipo y declaró:

*Este prototipo será considerado en lo sucesivo como unidad de masa.*

La 3ª CGPM (1901), en una declaración tendente a eliminar la ambigüedad que se presentaba en el uso corriente del término “peso”, confirmó que:

El kilogramo es la unidad de masa; es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo.

#### c) Unidad de tiempo. El segundo.

El segundo, unidad de tiempo, se definió originalmente como la fracción 1/86 400 del día solar medio. La definición exacta del “día solar medio” se dejó a los astrónomos.

Sin embargo, las observaciones demostraron que esta definición no era satisfactoria debido a las irregularidades de la rotación de la Tierra. Para conseguir una definición más precisa de la unidad de tiempo, la 11ª CGPM (1960) aprobó una definición, proporcionada por la Unión Astronómica Internacional, que se basaba en el año trópico 1900.

Considerando que para la ciencia y la tecnología era indispensable una definición muy precisa de la unidad de tiempo, la 13ª CGPM (1967/68) reemplazó la definición del segundo por la siguiente:

**El segundo es la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133.**

**d) Unidad de intensidad de corriente eléctrica. El amperio.**

Las unidades eléctricas, llamadas “internacionales”, de corriente y resistencia, fueron introducidas por el Congreso Internacional de Electricidad, celebrado en Chicago en 1893, y las definiciones del amperio “internacional” y del ohmio “internacional” fueron confirmadas por la Conferencia Internacional de Londres en 1908.

Aunque en la 8ª CGPM (1933) había un deseo unánime de reemplazar aquellas unidades “internacionales” por otras, las llamadas “unidades absolutas”, la decisión oficial de suprimirlas no se adoptó hasta la 9ª CGPM (1948) que adoptó el amperio como unidad de intensidad de corriente eléctrica, de acuerdo con la definición siguiente propuesta por el CIPM (1946):

**El amperio es la intensidad de una corriente constante que, manteniéndose en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y situados a una distancia de 1 metro uno del otro, en el vacío, produciría entre estos conductores una fuerza igual a  $2 \times 10^{-7}$  newton por metro de longitud.**

De aquí resulta que la constante magnética,  $\mu_0$ , también conocida como permeabilidad del vacío, es exactamente igual a  $4\pi \times 10^{-7}$  henrio por metro,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m.

**e) Unidad de temperatura termodinámica. El kelvin.**

La definición de la unidad de temperatura termodinámica fue establecida por la 10ª CGPM (1954) que eligió el punto triple del agua como punto fijo fundamental, asignándole la temperatura de 273,16 K por definición. La 13ª CGPM (1967/68) adoptó el nombre “kelvin”, símbolo K, en lugar de “grado Kelvin”, símbolo °K y definió la unidad de temperatura termodinámica del siguiente modo (1967/68):

**El kelvin, unidad de temperatura termodinámica, es la fracción 1/273,16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.**

De aquí resulta que la temperatura termodinámica del punto triple del agua es igual a 273,16 kelvin exactamente.

**f) Unidad de cantidad de sustancia. El mol.**

El CIPM dio en 1967, y la confirmó en 1969, una definición del mol que fue adoptada finalmente por la 14ª CGPM (1971):

**1. El mol es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en 0,012 kilogramos de carbono 12; su símbolo es “mol”.**

**2. Cuando se emplee el mol, deben especificarse las entidades elementales, que pueden ser átomos, moléculas, iones, electrones u otras partículas o grupos especificados de tales partículas.**

De aquí resulta que la masa molar del carbono 12 es igual a 12 g por mol, exactamente,  $M(^{12}\text{C}) = 12$  g/mol.

### g) Unidad de intensidad luminosa. La candela.

Las unidades de intensidad luminosa basadas en patrones de llama o de filamento incandescente, que estuvieron en uso en diferentes países antes de 1948, fueron sustituidos por la “nueva candela” basada en la luminancia del emisor de radiación de Planck (cuerpo negro) a la temperatura de congelación del platino.

En 1979, debido a las dificultades experimentales para realizar un emisor de radiación de Planck a altas temperaturas y a las nuevas posibilidades ofrecidas por la radiometría, es decir, la medida de la potencia de la radiación óptica, la 16ª CGPM (1979) adoptó una nueva definición de la candela:

**La candela es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  hertz y cuya intensidad energética en dicha dirección de  $1/683$  vatio por estereorradián.**

De aquí resulta que la eficacia luminosa espectral de una radiación monocromática de frecuencia igual a  $540 \times 10^{12}$  hertz es igual a 683 lúmenes por vatio, exactamente,  $K = 683 \text{ lm/W} = 683 \text{ cd sr/W}$ .

#### 1.5.4 Unidades derivadas expresadas en función de unidades básicas.

Las unidades derivadas se definen como productos de potencias de las unidades básicas. Cuando el producto de potencias no incluye ningún factor numérico distinto del uno, las unidades derivadas se llaman *unidades derivadas coherentes*.<sup>32</sup> Las unidades básicas y las unidades derivadas coherentes del SI forman un conjunto coherente designado como *conjunto coherente de unidades SI*. Por tanto, si solamente se utilizan unidades de un conjunto coherente, no se requieren nunca factores de conversión entre unidades.

El número de magnitudes derivadas de interés para la ciencia y la tecnología puede, desde luego, extenderse sin límites. A medida que se desarrollan nuevos campos científicos, los investigadores introducen nuevas magnitudes para representar los intereses de cada campo, y junto con estas nuevas magnitudes vienen nuevas ecuaciones que las relacionan con aquellas magnitudes ya conocidas y de aquí, finalmente, a las magnitudes básicas. De esta forma las unidades derivadas que se utilicen con las nuevas magnitudes siempre pueden definirse como producto de potencias de las unidades básicas previamente elegidas

Magnitud derivada		Unidad SI derivada coherente	
Nombre	Símbolo	Nombre	Símbolo
área, superficie	$A$	metro cuadrado	$\text{m}^2$
volumen	$V$	metro cúbico	$\text{m}^3$
velocidad	$v$	metro por segundo	$\text{m/s}$
aceleración	$a$	metro por segundo cuadrado	$\text{m/s}^2$
número de ondas	$\sigma$	metro a la potencia menos uno	$\text{m}^{-1}$
densidad, masa en volumen	$\rho$	kilogramo por metro cúbico	$\text{kg/m}^3$
densidad superficial	$\rho_A$	kilogramo por metro cuadrado	$\text{kg/m}^2$
volumen específico	$v$	metro cúbico por kilogramo	$\text{m}^3/\text{kg}$
densidad de corriente	$j$	amper por metro cuadrado	$\text{A/m}^2$
campo magnético	$H$	amper por metro	$\text{A/m}$

Tabla 2. Ejemplos de unidades SI derivadas coherentes expresadas a partir de las unidades básicas

<sup>32</sup> **Unidad de medida coherente** es una Unidad de medida derivada que se puede expresar como un producto de potencias de unidades básicas con un factor de proporcionalidad igual a uno. Es de notar que una unidad puede ser coherente respecto de un sistema de unidades pero no respecto a otro.

La expresión de la unidad coherente de una magnitud derivada puede obtenerse a partir del producto dimensional de esa magnitud, reemplazando el símbolo de cada dimensión por el símbolo de la unidad básica correspondiente.

A algunas de las unidades derivadas coherentes del SI se les da nombres especiales, para simplificar su expresión. Es importante destacar que cada magnitud física tiene solamente una unidad coherente SI, incluso si esta unidad puede expresarse de formas diferentes mediante el uso de nombres y símbolos especiales.

Como ejemplo de nombre especial, la combinación particular de unidades básicas  $m^2 kg s^{-2}$  para la energía ha recibido el nombre especial joule, símbolo J, donde por definición,  $J = m^2 kg s^{-2}$ .

La inversa, sin embargo, no es cierta: la misma unidad SI puede, en ciertos casos, emplearse para expresar los valores de varias magnitudes diferentes.

Magnitud derivada	Unidad derivada coherente SI			
	Nombre	Símbolo	Expresión mediante otras unidades SI	Expresión en términos de unidades SI básicas
frecuencia	hertz	Hz		$s^{-1}$
fuerza	newton	N		$m kg s^{-2}$
presión, tensión	pascal	Pa	$N/m^2$	$m^{-1} kg s^{-2}$
energía, trabajo, cantidad de calor	julio	J	$N m$	$m^2 kg s^{-2}$
potencia, flujo energético	watt	W	$J/s$	$m^2 kg s^{-3}$
carga eléctrica, cantidad de electricidad	coulomb	C		$s A$
diferencia de potencial eléctrico, fuerza electromotriz	voltio	V	$W/A$	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
capacitancia eléctrica	faradio	F	$C/V$	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
resistencia eléctrica	ohmio	$\Omega$	$V/A$	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
conductancia eléctrica	siemens	S	$A/V$	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
flujo magnético	weber	Wb	$V s$	$m^2 kg s^{-2} A^{-1}$
densidad de flujo magnético	tesla	T	$Wb/m^2$	$kg s^{-2} A^{-1}$
inductancia	henry	H	$Wb/A$	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
temperatura Celsius	Grado Celsius	$^{\circ}C$		K
flujo luminoso	lumen	lm	$cd sr$	cd
luminancia	lux	lx	$lm/m^2$	$m^{-2} cd$

**Tabla 2.3. Unidades SI derivadas coherentes con nombres y símbolos especiales**

### 1.5.5 Los múltiplos y submúltiplos de las unidades se forman mediante prefijos:

La 11ª CGPM (1960) adoptó los nombres y símbolos de prefijos para formar los nombres y símbolos de los múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades SI desde  $10^{12}$  hasta  $10^{-12}$ . Los prefijos para  $10^{15}$  y  $10^{-18}$  fueron añadidos por la 12ª CGPM (1964), y para  $10^{15}$  y  $10^{18}$  por la 15ª CGPM (1975). Asimismo, los prefijos para  $10^{21}$ ,  $10^{24}$ ,  $10^{-21}$  y  $10^{-24}$  se añadieron en la 19ª CGPM (1991). La tabla 5 enumera los nombres y símbolos de los prefijos aprobados.

Estos prefijos son convenientes para expresar los valores de magnitudes mucho más grandes o mucho más pequeñas que la unidad coherente. Siguiendo la Recomendación 1 del CIPM (1969), a estos se les ha dado el nombre de *Prefijos SI*. (Estos prefijos se emplean también a veces con unidades fuera del SI.

Múltiplos			Submúltiplos		
Factor	Nombre del Prefijo	Símbolo	Factor	Nombre del Prefijo	Símbolo
$10^1$	deca	da	$10^{-1}$	deci	d
$10^2$	hecto	h	$10^{-2}$	centi	c
$10^3$	kilo	k	$10^{-3}$	mili	m
$10^6$	mega	M	$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^9$	giga	G	$10^{-9}$	nano	n
$10^{12}$	tera	T	$10^{-12}$	pico	p
$10^{15}$	peta	P	$10^{-15}$	femto	f
$10^{18}$	exa	E	$10^{-18}$	atto	a
$10^{21}$	zetta	Z	$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	yotta	Y	$10^{-24}$	yocto	y

Tabla 5

El conjunto completo de las unidades SI, incluyendo tanto el conjunto coherente como los múltiplos y submúltiplos de estas unidades formados al combinarlas con los prefijos SI, se designa como *conjunto completo de unidades SI*, o simplemente *unidades SI*, o *unidades del SI*.

### 1.5.6 Algunas reglas de escritura de los nombres y símbolos de las unidades y prefijos. Expresión de los valores de las magnitudes

El metro por segundo, símbolo m/s, es la unidad coherente SI de velocidad. El kilómetro por segundo, km/s, el centímetro por segundo, cm/s y el milímetro por segundo, mm/s, son también unidades SI, pero no son unidades SI coherentes.

Los símbolos de los prefijos se escriben en caracteres romanos (rectos), como los símbolos de las unidades, independientemente del tipo de letra del texto adyacente, y se unen a los símbolos de las unidades, sin dejar espacio entre el símbolo del prefijo y el de la unidad. Con excepción de da (deca), h (hecto) y k (kilo), todos los símbolos de prefijos de múltiplos se escriben con mayúsculas y todos los símbolos de prefijos de submúltiplos se escriben con minúsculas. Todos los nombres de los prefijos se escriben con minúsculas, salvo al comienzo de una frase.

Los prefijos de los múltiplos y submúltiplos de las unidades iguales o inferiores a  $10^3$  se escriben en minúscula, es decir desde k (kilo) hacia abajo, y superiores a  $10^3$  en mayúsculas, es decir desde M (mega) hacia arriba.

Un *error muy frecuente* es escribir el símbolo del kilogramo con primera letra mayúscula:

Correcto	Incorrecto
kg	Kg

El grupo formado por un símbolo de prefijo y un símbolo de unidad constituye un nuevo símbolo de unidad inseparable (formando un múltiplo o un submúltiplo de la unidad en cuestión) que puede ser elevado a una potencia positiva o negativa y que puede combinarse con otros símbolos de unidades compuestas.

*Ejemplos:*

$$2,3 \text{ cm}^3 = 2,3 (\text{cm})^3 = 2,3 (10^{-2} \text{ m})^3 = 2,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ cm}^{-1} = 1 (\text{cm})^{-1} = 1 (10^{-2} \text{ m})^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1} = 100 \text{ m}^{-1}$$

$$1 \text{ V/cm} = (1 \text{ V})/(10^{-2} \text{ m}) = 10^2 \text{ V/m} = 100 \text{ V/m}$$

$$5000 \mu\text{s}^{-1} = 5000 (\mu\text{s})^{-1} = 5000 (10^{-6} \text{ s})^{-1} = 5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$$

Por ejemplo, "km<sup>2</sup>" se lee *kilómetro cuadrado*, no *kilo–metro cuadrado*. Por ejemplo, 3 km<sup>2</sup> son 3 000 000 m<sup>2</sup>, no 3 000 m<sup>2</sup> (ni tampoco 9 000 000 m<sup>2</sup>).

Son mejores los prefijos cuya potencia es múltiplo de tres. Por ello es preferible emplear "100 m" que "1 hm". Hay, sin embargo, algunas excepciones importantes: el centímetro, la hectárea (hecto-área), el centilitro, el decímetro cúbico (equivalente a un litro), el hectopascal y el decibelio (la décima parte de un belio).

La unidad astronómica, el año-luz y el pársec se emplean, en cambio, a menudo; en el reglamento del SI, la unidad astronómica figura como una unidad aceptable pero oficialmente fuera del sistema.

El megasegundo también se emplea en ocasiones, aunque son más habituales determinadas formas de notación científica o las horas, los minutos y otras unidades que denotan tiempos tan largos o más que dichas unidades.

Del mismo modo, los nombres de los prefijos son inseparables de los nombres de las unidades a las que se unen. Así, por ejemplo, milímetro, micropascal y meganewton se escriben en una sola palabra.

Los símbolos de prefijos compuestos; es decir, los símbolos de prefijos formados por yuxtaposición de dos o más símbolos de prefijos, no están permitidos. Esta regla se aplica también a los nombres de los prefijos compuestos.

nm (nanómetro) sí, **pero no** mμm (milimicrómetro)

Los símbolos de los prefijos no pueden utilizarse solos o unidos al número 1, símbolo de la unidad uno. Igualmente, los nombres de los prefijos no pueden unirse al nombre de la unidad uno, es decir a la palabra "uno".

El número de átomos de plomo en una muestra es igual a  $N(\text{Pb}) = 5 \times 10^6$  átomos, **pero no**  $N(\text{Pb}) = 5 \text{ M}$  átomos, donde M representaría el prefijo mega.

### El kilogramo.

Como excepción, el nombre del kilogramo, que es la unidad básica de masa, incluye el prefijo kilo por razones históricas. Sin embargo, es una unidad básica del SI. Los múltiplos y submúltiplos del kilogramo se forman añadiendo los nombres de los prefijos al nombre de la unidad "gramo" y los símbolos de los prefijos al símbolo de la unidad "g". Así 10<sup>-6</sup> kg se escribe miligramo, mg, y no microkilogramo, μ kg.

Los principios generales referentes a la escritura de los símbolos de las unidades y de los nombres fueron propuestos durante la 9ª CGPM (1948).

- **Símbolos de las unidades.** Los nombres de las unidades se imprimen en caracteres romanos (rectos) y se consideran como nombres (sustantivos) comunes. En español, los nombres de unidades empiezan por minúscula (incluso cuando el símbolo de la unidad comience por mayúscula), salvo que se encuentren situados al comienzo de una frase o en un texto en mayúsculas, como un título. Para cumplir esta regla, la escritura correcta del nombre de la unidad cuyo símbolo es °C es "grado Celsius" (la unidad grado comienza por la letra g en minúscula y el atributo Celsius comienza por la letra C en mayúscula, porque es un nombre propio).

Nombre de unidad	Símbolo	Nombre de unidad	Símbolo
julio	J	amperio	A
hertz	Hz	vatio	W
metro	m	grado Celsius	°C
segundo	s	litro	L ó l

- Una excepción, adoptada por la 16ª CGPM (1979), es que se permite el uso de la letra L en mayúscula o l en minúscula como símbolos del litro, a fin de evitar la confusión entre la cifra 1 (uno) y la letra l (ele).
- Al expresar cantidades, el número debe ir seguido del símbolo de su unidad, no de alguna abreviatura de la unidad, dejando un espacio entre el valor numérico y el símbolo de la unidad. Esta regla se debe aplicar a cualquier símbolo que siga a un número, no solo aquellos símbolos de unidades.

Correcto	Incorrecto
5 s,	5 seg
3 %	3%

- Los símbolos de las unidades siempre deben escribirse con caracteres rectos independientemente del tipo de letra empleada en el texto. Deben ser escritos sin punto final (salvo exigencias de la puntuación normal, como final de frase), y sin modificación alguna en el uso del plural.

Correcto	Incorrecto
4 m	4 m

- Los símbolos de las unidades deben estar escritos en minúsculas, pero si el nombre de la unidad deriva de un nombre propio la primera letra debe ser mayúscula. *Por ejemplo:* N (newton), W (vatio), Hz (hercio), etc.
- Cuando se usa el nombre completo de las unidades fundamentales y derivadas o de sus múltiplos y submúltiplos, debe escribirse con minúscula incluso si procede de un nombre propio (ejemplo: pascal, newton, joule). Se exceptúa Celsius en "grado Celsius".
- No deben usarse prefijos con la unidad °C.
- Los símbolos de las unidades son entidades matemáticas y no abreviaturas. Por tanto, no van seguidos de un punto, salvo al final de una frase, ni se usa el plural, ni se pueden mezclar símbolos de unidades con nombres de unidades en una misma expresión, pues los nombres no son entidades matemáticas.

75 cm de longitud, **pero no** 75 cm. de longitud

$l = 75$  cm, **pero no** 75 cms

culombio por kilogramo, **pero no** culombio por kg

**Con frecuencia** se ve en la señalización de carreteras:

"A.....100 kms". Lo que constituye un error ("A.....100 km" sería lo correcto).

- Aunque los valores de las magnitudes se expresan generalmente mediante los nombres y símbolos de las unidades, si por cualquier razón resulta más apropiado el nombre de la unidad que su símbolo, debe escribirse el nombre de la unidad completo.

2,6 m/s, o 2,6 metros por segundo

- Cuando el nombre de la unidad está combinado con el prefijo de un múltiplo o submúltiplo, no se deja espacio ni se coloca guión entre el nombre del prefijo y el de la unidad. El conjunto formado por el nombre del prefijo y el de la unidad constituye una sola palabra.

miligramo, **pero no** mili-gramo

kilopascal, **pero no** kilo-pascal

- En español, sin embargo, cuando el nombre de una unidad derivada se forma por multiplicación de nombres de unidades individuales, conviene dejar un espacio, un punto centrado a media altura ( $\cdot$ ), o colocar un guión para separar el nombre de cada unidad.

pascal segundo, o pascal-segundo

- Asimismo en español, las denominaciones del tipo “cuadrado” o “cúbico”, utilizadas con los nombres de las unidades elevadas a las potencias correspondientes, se colocan detrás del nombre de la unidad.

centímetro cuadrado,  
milímetro cúbico,  
amperio por metro cuadrado,

- El símbolo de la unidad se sitúa delante del símbolo del prefijo sin espacio alguno, formando un nuevo símbolo. Que al igual que el símbolo de la unidad se puede elevar a un exponente.

*Nota:*  $\text{km}^2$  significa  $(\text{km})^2$  y nunca  $\text{k}(\text{m})^2$

- El producto de los símbolos de dos o más unidades se indica por medio de un punto entre ambos símbolos, o un espacio entre ambos, nunca por medio de un aspa x.

Por ejemplo: Newton por metro

Correcto	Incorrecto
$\text{N}\cdot\text{m}$ , $\text{N m}$	$\text{Nxm}$ o $\text{mN}$ que significa milinewton.

- Para formar los productos y cocientes de los símbolos de las unidades, se aplican las reglas habituales de multiplicación o de división algebraicas. La multiplicación debe indicarse mediante un espacio o un punto centrado a media altura ( $\cdot$ ), para evitar que ciertos prefijos se interpreten erróneamente como un símbolo de unidad. La división se indica mediante una línea horizontal, una barra oblicua (/), o mediante exponentes negativos. Cuando se combinan varios símbolos de unidades, hay que tener cuidado para evitar toda ambigüedad, por ejemplo utilizando corchetes o paréntesis, o exponentes negativos. En una expresión dada sin paréntesis, no debe utilizarse más de una barra oblicua, para evitar ambigüedades.

$\text{N m}$  ó  $\text{N}\cdot\text{m}$  para newton metro

$\text{m/s}$  ó  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  ó  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , para metro por segundo

$\text{ms}$ , milisegundo

$\text{m s}$ , metro segundo

$\text{m kg}/(\text{s}^3 \text{ A})$  o  $\text{m kg s}^{-3} \text{ A}^{-1}$  **pero no**  $\text{m kg/s}^3/\text{A}$ ,  $\text{m kg}/\text{s}^3 / \text{A}$  **ni**  $\text{m kg}/\text{s}^3 \text{ A}$

Correcto	Incorrecto
$\text{m/s}$ , $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{m/s/s}$

No se permite emplear abreviaturas para los símbolos y nombres de las unidades, como seg (por s o segundo), mm cuad. (por  $\text{mm}^2$  o milímetro cuadrado), cc (por  $\text{cm}^3$  o centímetro cúbico) o mps (por m/s o metro por segundo). El uso correcto de los símbolos de las unidades SI y de las unidades en general, como se ha dicho antes es obligatorio. De esta forma se evitan ambigüedades y malentendidos respecto a los valores de las magnitudes.

### 1.5.7 Sistema CGS Gaussiano.

Los primeros sistemas métricos que se desarrollaron estaban orientados a la mecánica y al calor, y por tanto eran incompletos para cubrir las necesidades de la teoría electromagnética que tuvo gran auge en el siglo XIX. Gauss<sup>33</sup> fue de los primeros físicos en efectuar medidas *absolutas*<sup>34</sup> del campo magnético terrestre empleando un sistema decimal basado en las *tres unidades mecánicas* milímetro, gramo y segundo (CGS) para las magnitudes longitud, masa y tiempo respectivamente. En 1874, la BAAS<sup>35</sup> reconoció al sistema de CGS como un sistema coherente de unidades<sup>36</sup> basado en las tres unidades anteriores con prefijos que se extienden de micro a mega para expresar submúltiplos y múltiplos decimales. El desarrollo siguiente de la física como ciencia experimental se basó en gran parte en este sistema. Este sistema respondió a las necesidades de la ciencia cuando esta última se interesaba en sistemas de pequeñas dimensiones. Ciertas unidades derivadas del sistema CGS han mantenido sus nombres especiales, como por ejemplo: la dina o *dyne* (dyn) para la fuerza, el ergio o *erg* (erg) para el trabajo, el *poise* (P o Po) para la viscosidad dinámica, etc.

En los últimos años, Gauss extendió esas mediciones para incluir fenómenos eléctricos. En este sistema, la unidad de carga se define como la fuerza que se ejerce entre cargas. Una consecuencia de este método es que la ley de Coulomb no contiene una constante de proporcionalidad.

Gauss consideró a la constante de proporcionalidad en la ley de Coulomb,  $k_1 = 1$ .

$$F = k_1 \frac{Qq}{r^2}$$

La ecuación de Coulomb queda como:

$$F = \frac{Qq}{r^2}$$

De la ecuación de Coulomb (suponiendo  $Q = q$ ) se deduce

$$q^2 = F \cdot r^2$$

De esta forma, la unidad de carga eléctrica quedó definida y se denominó franklin, statcoulomb o u.e.s. de carga queda como

$$\text{statcoulomb } b = (\text{dina}^{1/2} \cdot \text{cm})$$

La ecuación dimensional de carga eléctrica:

$$q^2 = F \cdot r^2 = (m \cdot a) \cdot r^2 = (M \cdot \frac{L}{T^2}) L^2 = ML^3 T^{-2}$$

$$q = (L^{3/2} M^{1/2} T^{-1})$$

$$q = (\text{cm}^{3/2} \text{g}^{1/2} \text{s}^{-1})$$

Lo anterior muestra que la carga eléctrica en este sistema queda definida con referencia a las unidades mecánicas CGS.

<sup>33</sup> Johann Carl Friedrich Gauss (30 de abril de 1777 – 23 de febrero de 1855), fue un matemático, astrónomo, geodesta, y físico alemán que contribuyó significativamente en muchos campos, incluida la teoría de números, el análisis matemático, la geometría diferencial, la estadística, el álgebra, la geodesia, el magnetismo y la óptica. Considerado «el príncipe de las matemáticas» y «el matemático más grande desde la antigüedad». En 1832, Gauss promovió fuertemente el Sistema Métrico, junto con la definición del segundo en astronomía.

<sup>34</sup> Una medida indicada mediante unidades absolutas está completamente definida, ya que su valor no depende de otro valor de referencia, ni del lugar de donde se utilicen las medidas.

<sup>35</sup> Asociación Británica para el Avance de la Ciencia (British Association for the Advancement of Science, BAAS) se reunió por primera vez en 1831. Su objetivo era enfrentar y rectificar lo que muchos vieron como el "declive de la ciencia en Inglaterra.

<sup>36</sup> Sistema de unidades en el que todas las unidades derivadas se pueden expresar como productos de potencias de las unidades fundamentales con factores de proporcionalidad iguales a uno.

Un statcoulomb es la cantidad de carga eléctrica que poseen dos partículas respectivamente, separadas a una distancia de un centímetro que se repelen (o atraen, según la polaridad de sus cargas) con una fuerza de una raíz cuadrada de una dina.

En cuanto a la intensidad de corriente, ésta es igual a la derivada de la carga con respecto al tiempo (variación de la carga con respecto al tiempo):

$$i = \frac{dq}{dt}$$

En este mismo sistema, la intensidad de corriente tiene como dimensión

$$[i = (L^{3/2} M^{1/2} T^{-2})]$$

y la intensidad unitaria es la producida por una carga unitaria durante un segundo

$$\text{statampere} = \frac{\text{statcoulomb}}{s}$$

Nuevamente se muestra que la corriente eléctrica en este sistema queda definida con referencia a las unidades mecánicas CGS.

Otro caso, por ejemplo, la ecuación *dimensional de potencial electrostática*.

$$V = \frac{W}{q} = q^{-1} \cdot W = q^{-1} \cdot F \cdot r = (M^{1/2} L^{3/2} T^{-1})^{-1} (MLT^{-2}) L = M^{1/2} L^{1/2} T^{-1}$$

$$V = M^{1/2} L^{1/2} T^{-1}$$

La unidad de potencial eléctrico definida en este sistema, se le llama statvolt.

Otra característica del sistema CGS gaussiano es que el campo eléctrico y el campo magnético tienen las mismas unidades.

Valores de las constantes y dimensiones de las magnitudes	CGS electrostático	CGS electromagnético	CGS gaussiano	CGS de Heaviside-Lorentz
$\epsilon_0$	1	$9 \cdot 10^{20} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	1	1
$\mu_0$	$1/9 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^2$	1	1	1
Carga eléctrica (Q)	$L^{3/2} \cdot M^{1/2} \cdot T^{-1}$	$L^{1/2} \cdot M^{1/2}$	$L^{3/2} \cdot M^{1/2} \cdot T^{-1}$	$L^{3/2} \cdot M^{1/2} \cdot T^{-1}$
Intensidad de corriente (I)	$L^{1/2} \cdot M^{1/2} \cdot T^{-2}$	$L^{-1/2} \cdot M^{1/2} \cdot T^{-1}$	$L^{1/2} \cdot M^{1/2} \cdot T^{-2}$	$L^{1/2} \cdot M^{1/2} \cdot T^{-2}$
Campo eléctrico (E)	$L^{-1/2} \cdot M^{1/2} \cdot T^{-1}$	$L^{-3/2} \cdot M^{1/2} \cdot T^{-1}$	$L^{-3/2} \cdot M^{1/2} \cdot T^{-3}$	$L^{-3/2} \cdot M^{1/2} \cdot T^{-3}$
Inducción magnética (B)	$L^{-3/2} \cdot M^{1/2}$	$L^{-3/2} \cdot M^{1/2}$	$L^{-3/2} \cdot M^{1/2} \cdot T^{-3}$	$L^{-3/2} \cdot M^{1/2} \cdot T^{-3}$

Tabla 1. Diferencias entre los diversos sistemas CGS

Los valores donde aparece el número  $3 \cdot 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  corresponden a la velocidad de la luz en el vacío. El valor real a utilizar es 299 792 458 m/s

En la siguiente tabla se tiene el sistema CGS de forma más completa:

		Sistema, Autor y Año		
		CGS electrostático J.C. Maxwell 1863	CGS electromagnético J.C. Maxwell 1863	QES J.C. Maxwell 1881
Constantes y dimensiones de las magnitudes	Longitud	cm	cm	Cuadrante = $10^9$ cm
	Tiempo	s	s	s
	Masa	g	g	$10^{-11}$ g
	Fuerza	dina	dina	centidina
	Energía	erg	erg	joule
	Potencia	erg/s	erg/s	watt
	Temperatura	°C	°C	°C
	Carga eléctrica	estatcoulomb	aboulomb	coulomb
	Corriente eléctrica	estatampere	abampere	ampere
	Resistencia eléctrica	estatohm	abohm	ohm
	Constante dieléctrica	estatfarad/cm	abfarad/cm	estatfarad/cm
	Permeabilidad	estathenry/cm	abhenry/cm	estathenry/cm

Tabla 2. Sistemas métricos completos de unidades CGS

### 1.5.8 El sistema práctico o QES.

El *sistema práctico* es de uso electromagnético y tiene como unidades fundamentales el centímetro a la nueve ( $10^9$  cm =  $10^7$  m, aproximadamente igual al cuadrante del meridiano terrestre) de longitud; el gramo a la menos once ( $10^{-11}$  g. o picodecagramo) de masa material; el segundo de tiempo, y como cuarta magnitud fundamental una constante de proporcionalidad electromagnética.

Mediante las ecuaciones dimensionales electromagnéticas se puede hallar la equivalencia entre las unidades prácticas y cegesimales. Ejemplo equivalencia entre un voltio del sistema práctico y una u.e.m. de potencial C G S (un abvoltio):

La ecuación dimensional de potencial eléctrico:  $V = (M^{1/2} L^{3/2} T^{-2})$

$$\text{c.g.s. u.e.m.: } 1 \text{ abvoltio} = g^{1/2} cm^{3/2} s^{-2}$$

$$\text{Práctico: } 1 \text{ voltio} = (10^{-11})^{1/2} g^{1/2} (10^9)^{3/2} cm^{3/2} s^{-2} = 10^8 g^{1/2} cm^{3/2} s^{-2}$$

$$1 \text{ voltio} = 10^8 \text{ abvoltio}$$

Como conocemos la relación entre las unidades cegesimales electromagnéticas y electrostáticas (número de Maxwell), deduciremos fácilmente la relación entre el sistema práctico y el cegesimal electrostático. Así:

Si 1 ues de potencial = c uem de potencial

$$1 \text{ voltio} = 10^8 \text{ uem} = \frac{10^8}{3 \cdot 10^{10}} \text{ ues} = \frac{1}{300} \text{ statvolt}$$

Equivalencia entre el amperio y la uem cgs de intensidad de corriente:

$$\text{Sistema } [I] = [M^{1/2} L^{1/2} T^{-1} \mu_0^{-1/2}]$$

$$\text{cgs uem} = [g^{1/2} cm^{1/2} s^{-1}] = 1 \text{ abampere}$$

$$\text{práctico } A = \left[ (10^{-11})^{1/2} \cdot g^{1/2} (10^{-9})^{1/2} \cdot cm^{-1/2} 1 \cdot s^{-1} \cdot 1 \right] = \left[ 10^{-1} \right] \text{ abampere}$$

Si 1 uem (cgs) de intensidad = c ues (cgs) de intensidad.

$$\begin{aligned} 1 \text{ Amperio} &= 10^{-1} \text{ uem (abampere)} = 10^{-1} \cdot 3 \cdot 10^{10} \text{ ues} \\ &= 3 \cdot 10^9 \text{ statampere} \end{aligned}$$

Esta equivalencia nos será de gran utilidad en el sistema internacional.

La íntima relación entre los fenómenos eléctricos, magnéticos y luminosos aún es más amplia, pues entre las tres constantes del vacío,  $c$ ,  $\mu_0$  y  $\epsilon_0$  existe la relación:

$$\begin{aligned} c \cdot \mu_0^{1/2} \cdot \epsilon_0^{1/2} &= 1 \\ c^2 \cdot \mu_0 \cdot \epsilon_0 &= 1 \end{aligned}$$

Esta relación sirve para hallar los valores de  $\epsilon_0$  en el sistema cgs electromagnético y los de  $\mu_0$  en el sistema cgs electrostático, y también para hallar los valores de  $\mu_0$ , (giorgi) conocidos los de  $\epsilon_0$  (giorgi) o viceversa.

a) Sistema cgs electromagnético racionalizado

$$\mu_0 = 4\pi \qquad \epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \cdot c^2} = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{20}}$$

b) Sistema cgs electrostático racionalizado

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi} \qquad \mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot c^2} = \frac{4\pi}{9 \cdot 10^{20}}$$

### 1.5.9 El sistema MTS

El sistema MTS (metro, tonelada, segundo) fue un sistema legal en Francia durante algunas décadas aunque no tuvo nunca la aprobación de los físicos. Sus unidades mecánicas fundamentales son el metro; la tonelada métrica,  $1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$ ; y el segundo. Las unidades derivadas que tienen un nombre especial son:

el steno,  $1 \text{ sn} = 10^3 \text{ N}$ , que es la unidad de Fuerza;

el kilojulio,  $1 \text{ kJ} = 10^3 \text{ J}$ , unidad de Energía;

el kilovatio,  $1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$  unidad de potencia;

y la pieza,  $1 \text{ pz} = 10^3 \text{ Pa}$ , unidad de presión.

### 1.5.10 El sistema MKS absoluto o Giorgi.

La aplicación de las unidades del sistema CGS en electricidad y magnetismo, resultaron incómodos. Así pues, en 1880, BAAS y el Congreso Eléctrico internacional, precursor de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), aprobaron un sistema mutuamente coherente de unidades prácticas. Como consecuencia en 1901 Giorgi propuso a la Asociación Electrotécnica Italiana el sistema de unidades que lleva su nombre, adoptado en 1935 por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)<sup>37</sup> como sistema MKSC (metro, kilogramo segundo, coulombio).

<sup>37</sup> La **Comisión Electrotécnica Internacional** (CEI o IEC por sus siglas en inglés) es una organización de normalización en los campos eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas. Su primer presidente fue Lord Kelvin. Numerosas normas se desarrollan conjuntamente con la ISO (normas ISO/IEC).

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) fue fundada en 1906, siguiendo una resolución aprobada en 1904 en el Congreso Internacional Eléctrico en San Luis Missouri.

A la CEI se le debe el desarrollo y difusión de los estándares para algunas unidades de medida, particularmente el gauss, hercio y weber; así como la primera propuesta de un sistema de unidades estándar, el sistema Giorgi, que con el tiempo se convertiría en el sistema internacional de unidades.

El sistema Giorgi al tener la carga eléctrica como magnitud fundamental, las dimensiones de cualquier magnitud eléctrica o magnética vendrán en función de M, L, T y Q.

Ejemplo: Las dimensiones de la magnitud potencial eléctrico:

$$V = \frac{W}{q} = [F \cdot L]Q^{-1} = M \cdot L^2 \cdot T^{-2} \cdot Q^{-1}$$

A partir de las ecuaciones dimensionales deducimos la equivalencia entre las unidades Giorgi y las unidades cegesimales electrostáticas o electromagnéticas, sabiendo 1 coulombio es igual a  $3 \times 10^9$  ues y a  $10^{-1}$  uem de carga.

En el ejemplo anterior tendremos:

$$\text{Sistema } [V] = M \cdot L^2 \cdot T^{-2} \cdot Q^{-1}$$

$$\text{cgs ues} = [g \cdot cm^2 \cdot s^{-2} ues^{-1}] = 1 \text{ ues de potencial}$$

$$\begin{aligned} \text{Giorgi voltio} &= [kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} coul^{-1}] = 10^3 g (10^2)^2 cm^2 \cdot s^{-2} \cdot (3 \cdot 10^9)^{-1} ues^{-1} \\ &= \frac{1}{300} ues \end{aligned}$$

$$\text{cgs uem} = [g \cdot cm^2 \cdot s^{-2} uem^{-1}] = 1 \text{ uem de potencial}$$

$$\begin{aligned} \text{Giorgi voltio} &= [kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} coul^{-1}] = 10^3 g \cdot (10^2)^2 cm^2 \cdot s^{-2} \cdot (10^{-1})^{-1} uem^{-1} \\ &= 10^8 uem \text{ de potencial} \end{aligned}$$

$$1 \text{ voltio} = 10^8 uem \text{ de potencial} = \frac{1}{300} ues \text{ de potencial}$$

En la ecuación de Coulomb el valor de la constante de proporcionalidad para el sistema giorgi vale  $K = 9 \cdot 10^9$

y la constante dieléctrica para el vacío es  $\epsilon = \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}$

$$F = K \frac{QQ'}{r^2} = \frac{QQ'}{4\pi \cdot r^2} = \frac{9 \cdot 10^9 QQ'}{r^2}$$

a) Sistema giorgi absoluto ( $c = 3 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$ )

$$\epsilon_0 = \frac{1}{9 \cdot 10^9} \quad \mu_0 = \frac{1}{c^2 \cdot \epsilon_0} = \frac{9 \cdot 10^9}{9 \cdot 10^{16}} = 10^{-7}$$

b) Sistema giorgi racionalizado

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \quad \mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot c^2} = \frac{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}{9 \cdot 10^{16}} = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

### 1.5.11 El sistema técnico o terrestre.

El sistema técnico decimal toma como unidades mecánicas fundamentales el metro como unidad de longitud; el kilogramo como unidad de fuerza; y el segundo como unidad de tiempo. El kilogramo se define como el peso del kilogramo patrón en un punto en que la aceleración de la gravedad sea la normal, por acuerdo adoptado en la 13a Conferencia General de Pesas y Medidas celebrada en 1968, se toma como valor normal el de la gravedad en Postdam (latitud  $52^{\circ}29'$  Norte), es decir,  $g = 9.81260 m s^{-2}$ , se eligió Postdam por estar situado en ella uno de los más destacados laboratorios de medidas gravitatorias.

La relación entre el kilogramo y el newton se deduce fácilmente, puesto que:

El peso en Postdam de una masa de 1 Kg será:

a) Sistema técnico decimal:  $P = 1 \text{ kg}$

b) Sistema internacional:  $P = m \cdot g = 1 \cdot 9.81 = 9.81 \text{ N}$

De dónde:  $1 \text{ kg}_{\text{fuerza}} = 9.81 \text{ N}$

En el sistema técnico, la unidad de masa no tiene nombre especial, denominándola unidad técnica de masa (UTM) y de la ecuación de definición se tiene:

$$1 \text{ UTM} = \frac{1 \text{ kg fuerza}}{1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}$$
$$1 \text{ UTM} = \frac{9.81 \text{ N}}{1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}} = \frac{9.81 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}}{1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}} = 9.81 \text{ kg}$$

Es decir, la UTM es 9.81 veces más grande que la masa de 1 kg en el sistema MKS.

En algunos textos la unidad kilogramo cuando se trata de la magnitud fuerza se le denomina kilopondio, o kilopeso. La unidad de trabajo se le denomina kilográmetro (kgm) (también se conoce dicha unidad como kilopondímetro).

### 1.5.12 Sistema de unidades inglés, imperial, anglosajón o FPS (por foot, poundal, second).



El sistema anglosajón de unidades es el conjunto de las unidades no métricas<sup>38</sup> (que se utilizan actualmente) es oficial en solo 3 países en el mundo, como Estados Unidos de América, Liberia y Birmania, además de otros territorios y países con influencia anglosajona pero de forma no oficial, como Bahamas, Barbados, Jamaica, Puerto Rico o Panamá, y en menor grado (particularmente en ingeniería y tecnología) en Latinoamérica. Pero existen discrepancias entre los sistemas de Estados Unidos y el Reino Unido (donde se llama el *sistema imperial*), e incluso sobre la diferencia de valores entre otros tiempos y ahora. Sus unidades de medida son guardadas en Londres, Inglaterra.

El sistema FPS. Sus unidades mecánicas fundamentales son el pie,  $1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$ ; la libra,  $1 \text{ Lb} = 0.45359 \text{ kg}$ ; y el segundo. El poundal como unidad de fuerza es la unidad derivada con nombre especial  $1 \text{ poundal} = 0.138254 \text{ N}$ .

Este sistema se deriva de la evolución de las unidades locales a través de los siglos, y de los intentos de estandarización en Inglaterra. Las unidades mismas tienen sus orígenes en la antigua Roma. Hoy en día, estas unidades están siendo lentamente reemplazadas por el Sistema Internacional de Unidades, aunque en Estados Unidos la inercia del antiguo sistema y el alto costo de migración ha impedido en gran medida el cambio.

Así, en el Reino Unido, a la vez que las naciones continentales adoptaban el sistema métrico, se hizo un esfuerzo de unificación de las unidades de medida, hasta entonces, como en el resto del mundo, distintas de región a región, para imponer el llamado sistema Imperial. Los Estados Unidos hicieron otro tanto, pero no siguieron los patrones de la antigua metrópoli y tomaron como base otro sistema, de modo que, generalmente, las unidades de medida inglesas son distintas a las de los Estados Unidos.

<sup>38</sup> Que no está basado en el metro como unidad de medida.

**Alguna unidades del sistema inglés de medidas**

Magnitud	Nombre	Símbolo	Equivalencia
longitud	inch (pulgada)	in	0.0254 m
	foot (pie)	ft	12 in = 0.305 m
	yarda	yd	3 ft = 36 in = 0.915 m
	mile (milla)	mi	1 609 m
	milla náutica		1 852 m
	legua	legua	3 mi = 4 828.032 m
	mil	mil	25.4 $\mu$ m
Superficie	Pulgada cuadrada	ln <sup>2</sup>	6.4516 cm <sup>2</sup>
	Pie cuadrado	ft <sup>2</sup>	0.09290306 m <sup>2</sup>
	Yarda cuadrada	yd <sup>2</sup>	0.836127 m <sup>2</sup>
	Milla cuadrada	mile <sup>2</sup>	2.589988 km <sup>2</sup>
	Acre	acre	4 046.856 m <sup>2</sup>
masa	Libra (pound)	lb	0.454 Kg
	slug	slug	14.5939 kg
	onza	oz	0.0283 kg
	tonelada inglesa, (tonelada larga)	ton	1016 kg
	tonelada (USA), (tonelada corta)	ton	907.2 kg
tiempo	segundo (second)	s	
velocidad	Pie/segundo (foot per second)	ft/s	0.305 m/s
	nudo (knot)		1 milla náutica/h 1.852 km/h

**Alguna unidades del sistema inglés de medidas (continuación)**

fuerza	pound-wt (libra-peso)	lb-wt	
	poundal		
energía y trabajo	foot- pound	ft- lb	1355 J
	foot- poundal		
	british thermal unit	BTU	252 cal = 1 055 J
potencia	foot pound per second	ft- lb/s	1 355 W
	horse-power	HP	745.7 W
	Caballo de vapor		735.75 W
presión	pound-wt per sq. inch (libra-peso por pulgada cuadrada)	lb-wt/in <sup>2</sup> psi	6895 Pa
	pound-wt per sq. foot (libra-peso por pie cuadrado)	lb-wt/ft <sup>2</sup>	

**Unidades de volumen en líquidos**

Nombre	Abreviatura	Equivalencia	
		Reino Unido	EE.UU.
onza líquida	fl oz	1 fl oz = 28.4130625 · 10 <sup>-3</sup> l	1 fl oz = 29.5735295625 · 10 <sup>-3</sup> l
pinta	pt	1 pt = 20 fl oz = 568.26125 · 10 <sup>-3</sup> l	1 pt = 16 fl oz = 473.176473 · 10 <sup>-3</sup> l
cuarto	qt	1 qt = 2pt = 1.1365225 l	1 qt = 2pt = 946.352946 · 10 <sup>-3</sup> l
galon	gal	1 gal = 4 qt = 4.54609 l	1 gal = 4 qt = 3.785411784 l
barril	barril	1 barril = 35 gal = 159.113151 l	1 barril = 42 gal = 158.987294928 l

Equivalencias entre el sistema ingles y el sistema internacional (SI)							
Longitud		plg	pie	yd	mm	m	km
	1 plg (in)	1	0,08333	0,02778	25,4	0,0254	$2.54 \times 10^{-5}$
	1 pie (ft)	12	1	0,333	304,8	0,3048	$3.048 \times 10^{-4}$
	1 yd	36	3	1	914,4	0,9144	$9.14 \times 10^{-4}$
	1 mm	0,03937	$3281 \times 10^{-6}$	$1094 \times 10^{-6}$	1	0,001	$10^{-6}$
	1 m	39,37	3,281	1,094	1000	1	0,001
	1 km	39370	3281	1094	$10^{-6}$	1000	1
Área		plg <sup>2</sup>	pie <sup>2</sup>	yd <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	dm <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>
	1 plg <sup>2</sup>	1	$6.9 \times 10^{-3}$	$7.72 \times 10^{-4}$	6,452	0,06452	$64.5 \times 10^{-5}$
	1 pie <sup>2</sup>	144	1	0,1111	929	9,29	0,0929
	1 yd <sup>2</sup>	1296	9	1	8361	83,61	0,8361
	1 cm <sup>2</sup>	0,155	$1.07 \times 10^{-3}$	$1.20 \times 10^{-4}$	1	0,01	0,0001
	1 dm <sup>2</sup>	15,5	0,1076	0,01196	100	1	0,01
	1 m <sup>2</sup>	1550	10,76	1,196	10000	100	1

## 1.6 TIPOS DE CORRIENTE ELÉCTRICA.

Hay diferentes formas de clasificar la corriente eléctrica. Por ejemplo, por su comportamiento hay dos tipos: la corriente directa y la corriente alterna. Pero, a partir de esta subdivisión, se tienen otras formas de corriente eléctrica. Para explicar las características de los diferentes tipos de corriente, se inicia este tema con una revisión de los principios fundamentales de la electricidad.

### 1.6.1 Fundamentos de electricidad.

La electricidad (del griego ἤλεκτρον, *elektron*, cuyo significado es ámbar<sup>39</sup>) es el conjunto de fenómenos físicos relacionados con la presencia y el flujo de cargas eléctricas. Se manifiesta en una gran variedad de fenómenos. Actualmente la electricidad es indispensable para la civilización moderna. Sin ella, la vida, en la forma que hoy la conocemos resultaría imposible, porque todo mundo depende de la electricidad en servicios tales como teléfonos, televisión, radio, alumbrado, transporte; la industria, por su parte, hace uso de motores eléctricos para mover máquinas, bombas, compresores, ventiladores, ascensores; en automóviles para su arranque y funcionamiento, y en fin, se aplica en una interminable lista de otros muchos aparatos más. La **electricidad** es una de las principales formas de energía usadas en el mundo actual. La electricidad sigue ciertas leyes y que a través de ellas pueden ser comprendidas sus diversas aplicaciones al servicio del hombre. Aquí trataremos de explicar algunos de sus principios elementales.



<sup>39</sup> Tales de Mileto observó que frotando una varilla de ámbar con lana o piel, se lograba que ella atrajese pequeños objetos (actualmente este hecho es conocido como efecto triboeléctrico).

La electricidad como rama de la física comenzó muy antiguamente con observaciones aisladas y simples especulaciones. Por ejemplo, Tales de Mileto fue el primero en registrar sus observaciones de fenómenos eléctricos cuando, al frotar una barra de ámbar con un paño, notó que la barra podía atraer objetos livianos. Cerca de la antigua ciudad griega de Magnesia se encontraban las denominadas *pedras de Magnesia*, que incluían magnetita. Los antiguos griegos observaron que los trozos de este material se atraían entre sí, y también a pequeños objetos de hierro. Las palabras *magneto* (equivalente en español a imán) y el magnetismo derivan de ese topónimo.<sup>40</sup>

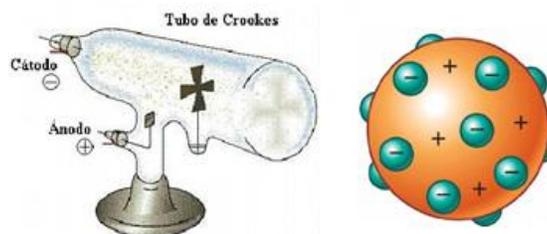
La teoría de la electricidad evolucionó históricamente desde la simple percepción del fenómeno, hasta su tratamiento científico, que se haría sistemático a partir del siglo XVIII, con los trabajos de Maxwell. Aunque no se han encontrado documentos que evidencien su utilización, hay descripciones anacrónicas de dispositivos eléctricos en muros egipcios y escritos antiguos. A lo largo de la Edad Antigua y Media se registraron observaciones aisladas y simples especulaciones. Esas especulaciones y registros fragmentarios son el tratamiento casi exclusivo (con la notable excepción del uso del magnetismo para la brújula) que hay desde la Antigüedad hasta la Revolución científica del siglo XVII.

Las magnitudes más importantes que manifiesta la electricidad son:

- polaridad,
- carga eléctrica,
- fuerza eléctrica.
- diferencia de potencial o voltaje,
- intensidad de la corriente,
- resistencia,
- potencia,
- efecto electromagnético,
- capacitancia,
- inductancia,
- resistividad,

#### 1.6.1.1 Concepto de polaridad y carga eléctrica.

Ciertos fenómenos electrostáticos fundamentales eran ya conocidos en épocas bastante lejanas del descubrimiento del electrón. Tales de Miletus, cerca de 600 AC, conoció el hecho de que el ámbar, al ser frotado adquiere el poder de atracción sobre algunos objetos. Sin embargo fue el filósofo Griego Theophrastus (374–287 AC) tres siglos después, estableció que otras sustancias tienen este mismo poder. Se puede decir que hasta 1700 se podía afirmar que los cuerpos tenían una propiedad que se manifestaban mediante fuerzas de atracción y repulsión. Se expresaba como un axioma<sup>41</sup>: *objetos con el mismo tipo de carga se repelen y con diferente polaridad se atraen*. Es decir, la interacción de una carga sobre otras, era un efecto conocido en la antigüedad pero que no llegó a ser comprendido debidamente sino hasta que fue descubierto el electrón por J.J. Thomson en 1897.



<sup>40</sup> El término *topónimo* hace referencia a un nombre derivado de un lugar o región.

<sup>41</sup> Proposición clara y evidente que no necesita demostración.

Según la teoría atómica clásica desarrollada a principios del siglo XX, cada átomo está formado por un núcleo pesado de carga positiva el cual se halla rodeado por una nube ligera de cargas negativas, los electrones. Todos los electrones tienen la misma carga y el mismo peso, todos parecen iguales entre sí. El núcleo de carga positiva de este átomo está formado de protones y neutrones. Los protones son cargas positivas, y los neutrones —su nombre lo dice— son partículas neutras. En un átomo hay el mismo número de protones y de electrones, y entonces se dice que un átomo es neutro.

El protón tiene la misma cantidad de carga eléctrica que el electrón pero positiva. Por otra parte, los protones y neutrones son mucho más pesados que los electrones —más de mil ochocientas veces—, pero los pesos de un protón y de un neutrón son casi iguales entre sí.

Toda la materia se halla compuesta por partículas extraordinariamente pequeñas que se llaman moléculas, cada una de las cuales posee todas las propiedades de la sustancia de que es constituyente. Las moléculas a su vez están formadas por átomos que son las unidades elementales más pequeñas, por ejemplo, el hidrógeno, el hierro, el cobre o el azufre.

El átomo está constituido de tres tipos de partículas subatómicas:

- El **electrón**<sup>42</sup> tiene dos propiedades fundamentales: poseer masa y carga eléctrica, identificada como carga tipo negativa.
- El **protón** tiene una masa mucho mayor que el electrón (aproximadamente 1836 veces más grande), y también igual cantidad de carga eléctrica, pero identificada como carga de tipo positiva.
- El **neutrón** no tiene carga eléctrica y posee masa igual que la del protón.
- El átomo está formado por núcleo y corteza.
  - En el núcleo se encuentran protones y neutrones, en número diferente según el elemento de que se trate. Por ejemplo, el hidrógeno tiene un solo protón. En cambio el sodio tiene once protones y doce neutrones.
  - La corteza está formada por capas, en las cuales giran los electrones en órbitas circulares alrededor del núcleo.

En cada capa hay uno o varios electrones. El número total de electrones de la corteza es igual al número de protones del núcleo, de tal manera que la carga eléctrica total de un átomo es nula.

*Número de cargas negativa "electrones" = número de cargas positivas "protones"*

La *presunción* de la existencia del electrón ha conducido a importantes descubrimientos en el campo de la electricidad, la electrónica, la química y la física atómica, por lo que podemos suponer sin temor a equivocarnos que el electrón *es una realidad*. Todos los equipos eléctricos y electrónicos han sido diseñados con base en la teoría de los electrones. En conclusión, la electricidad y otros fenómenos químicos se deben a la acción de los electrones al trasladarse de un punto a otro en la materia, o por la falta o exceso de electrones en la misma.

### 1.6.1.2 Electricidad Estática (Electrostática).

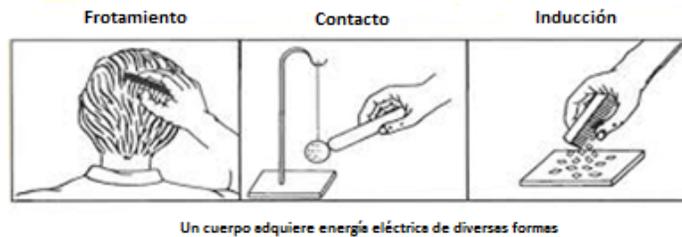
El término *electricidad estática* se refiere a la acumulación de un exceso de carga eléctrica en una zona de un material con poca conductividad eléctrica (materiales conocidos como aislantes o dieléctricos), de manera que la acumulación de cargas persiste. Los efectos de la electricidad estática son familiares para la mayoría de las personas porque se pueden ver, notar e incluso llegar a sentirse como las chispas de las descargas que se producen cuando el exceso de carga del objeto cargado se pone en contacto por medio de un conductor eléctrico a otro objeto con un exceso de carga pero con la polaridad opuesta.

---

<sup>42</sup> El electrón no fue identificado como una partícula hasta 1897 por Joseph John Thomson.

### 1.6.1.2.1 Separación de cargas por fricción o contacto.

Una forma de intercambiar electrones entre dos materiales es por contacto. Los materiales que tienen átomos con sus electrones débilmente ligados tienen tendencia a perderlos mientras que los materiales que no tienen llenas las capas externas de electrones tienen tendencia a ganarlos. Este fenómeno es conocido como triboelectricidad<sup>43</sup> y da como resultado que uno de los objetos que se han puesto en contacto queda cargado positivamente mientras el otro se carga negativamente. El efecto triboeléctrico es la causa principal de la electricidad estática que observamos en nuestra vida diaria e incluye la que se produce por rozamiento de diferentes materiales.



### 1.6.1.2.2 Separación de cargas inducida por la presión

Algunos tipos de cristales y cerámica tienen la propiedad de generar una separación de cargas en respuesta a la aplicación de una presión mecánica, se le denomina piezoelectricidad. Este es un fenómeno presentado por determinados cristales como el cuarzo y el rubidio que al ser sometidos a presiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica en su masa.



### 1.6.1.2.3 Separación de cargas inducida por la temperatura

Algunos minerales, como la turmalina, presentan la capacidad de ser polarizados (separar sus cargas eléctricas) por efecto del calor, es lo que se conoce como piroelectricidad o efecto piroeléctrico. Todos los materiales piroeléctricos son también piezoeléctricos, las dos propiedades están estrechamente relacionadas entre sí. La piroelectricidad es la capacidad de cambiar la polarización de algunos materiales sometidos a cambios de temperatura generando un potencial eléctrico producido por el movimiento de las cargas positivas y negativas a los extremos opuestos de la superficie.



<sup>43</sup> Se denomina **triboelectricidad** (del griego *tribein*, "frotar", electricidad por frotamiento).

#### 1.6.1.2.4 Descarga electrostática.

La chispa asociada a la electricidad estática es causada por la descarga electrostática que se produce cuando un exceso de carga fluye desde el entorno a un objeto cargándolo o desde éste hacia su entorno. En general, una acumulación significativa de cargas sólo puede ocurrir en zonas de baja conductividad eléctrica, en donde muy pocas cargas se pueden mover libremente. El flujo de las cargas neutralizadoras se genera a menudo a partir de átomos y moléculas neutras del aire, entonces se mueven en direcciones opuestas como una corriente eléctrica, neutralizando la acumulación original de cargas. El aire se rompe de esta manera alrededor de unos 30.000 voltios por centímetro, este valor depende de la humedad. La descarga calienta el aire de alrededor y produce una chispa brillante, también provoca una onda de choque que es la causante del sonido que se puede llegar a escuchar.



Descarga electrostática

El rayo es un ejemplo de una descarga electrostática que se puede observar en la naturaleza. Aunque los detalles no están del todo claros, se considera que la separación de las cargas está relacionada la fricción o contacto que se produce entre las partículas del aire que forman las nubes de tormenta. El rayo resultante no es otra cosa que una versión a gran escala de las chispas que podemos observar en las descargas electrostáticas domésticas. La emisión de luz por la descarga calienta el aire que hay alrededor de la trayectoria que sigue la corriente eléctrica y lo hace hasta una temperatura que produce luz por incandescencia. El sonido del trueno es el resultado de la onda de choque que se crea por la rápida expansión del aire sobre calentado.



El choque eléctrico que notamos cuando recibimos una descarga electrostática se debe a la estimulación de los nervios cuando la corriente neutralizadora fluye a través del cuerpo humano. Gracias a la presencia de agua que hay en todo el cuerpo y que se mueve, las acumulaciones de carga no llegan a ser lo suficientemente importantes como para causar corrientes eléctricas peligrosas.



choque eléctrico

### 1.6.2 El concepto de Fuerza.

El concepto de fuerza fue utilizado originalmente por Arquímedes, aunque únicamente lo empleó en términos estáticos. Arquímedes tenía la idea que el "estado natural" de los objetos materiales en la esfera terrestre era el reposo y que los cuerpos tendían por sí mismos hacia ese estado si no se actuaba sobre ellos en modo alguno. De acuerdo con Aristóteles la perseverancia<sup>44</sup> del movimiento requería siempre una causa eficiente<sup>45</sup>.

*Cuando hablamos de "fuerza" nos referimos físicamente a una acción que se ejerce sobre un cuerpo produciendo un determinado efecto. Este puede ser una modificación de su movimiento o de reposo, según sea el estado en que se encuentre, o de su aspecto físico (se puede producir una deformación). Incluso, pueden producirse ambos efectos al mismo tiempo. Todo depende de las características del objeto y de la magnitud de la fuerza que se le aplica.*



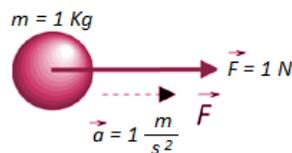
Resultados de la aplicación de fuerzas

Así, según definición clásica, fuerza es todo agente capaz de modificar la cantidad de movimiento o la forma de los materiales.

#### 1.6.2.1 Definición de la unidad de fuerza.

El **Newton (N)** es la unidad de fuerza en el Sistema Internacional de Unidades. Se define como la fuerza que aplicada a una masa de 1 kg incrementa su velocidad durante un segundo en 1 m/s.

O de otra forma, de acuerdo a la 2ª. Ley de Newton: Un Newton (N) es la fuerza que aplicada a una masa de 1kg le comunica una aceleración de  $1 \text{ m/s}^2$ .

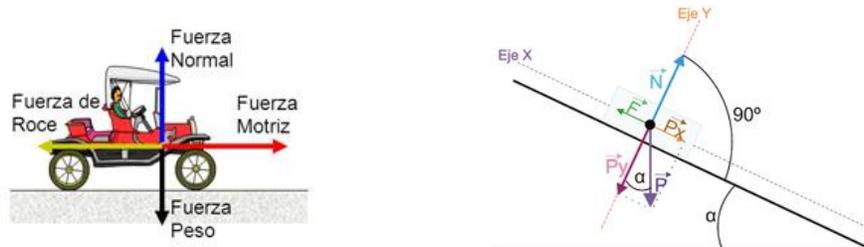


#### 1.6.2.2 Fuerzas por contacto.

Se considera que fue Newton el primero que formuló matemáticamente la moderna definición de fuerza. Las fuerzas por contacto son consecuencia de la teoría expresada por él en su principio de acción y reacción. En este principio, Newton determina que entre dos cuerpos en contacto existe una fuerza de igual magnitud: Un objeto sometido a dos fuerzas está físicamente en equilibrio cuando en el efecto producido, ambas se anulan mutuamente. En estos casos, es llamada fuerza normal a la fuerza ejercida sobre un plano que se contrarresta con la fuerza peso. En otras palabras, aludimos fuerza normal a la presión que se ejerce sobre un cuerpo en relación a su superficie y peso.

<sup>44</sup> La persistencia, la permanencia o continuidad.

<sup>45</sup> La **causa eficiente** o **causa motriz** es el motor o estímulo que desencadena el proceso de desarrollo. Por ejemplo, la causa eficiente de una mesa de madera será el carpintero. La **causa material** de una mesa es la madera, la materia que puede ser transformada a una mesa o cualquier otra cosa.



### Descomposición de fuerzas en un plano.

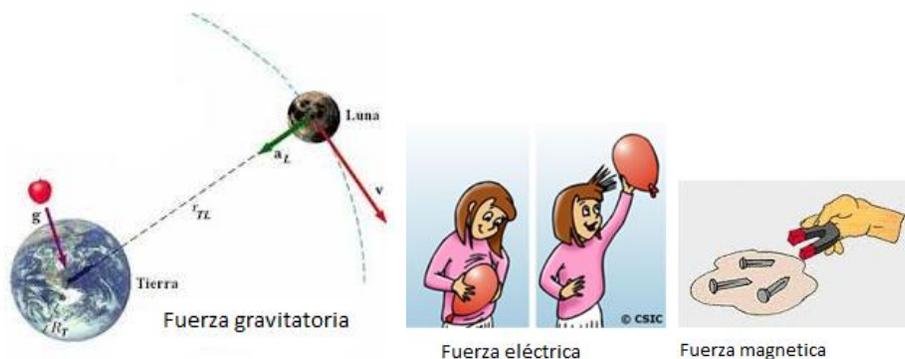
Son fuerzas de interacción por contacto: la fuerza normal, de empuje, de tensión, de rozamiento, elástica, etc.



### 1.6.2.3 Fuerzas a distancia.

La acción a distancia es una descripción de las fuerzas entre partículas situadas a cierta distancia que interactúan entre sí. Esta propiedad implica que para cada instante de tiempo las fuerzas sobre una partícula concreta debida a otras partículas depende de las posiciones de esas otras partículas en el mismo instante, como si la fuerza "se transmitiera instantáneamente" o existiera una "acción a distancia" por parte de las otras partículas.

Fuerzas a distancia: Cuando el cuerpo que ejerce la fuerza no está en contacto con el cuerpo u objeto sobre la que se aplica. Ejemplos de fuerzas a distancia, son la fuerza gravitatoria entre masas, o la eléctrica (o coulombica) entre cargas, debido a la que se producen cuando los cuerpos están separados cierta distancia unos de los otros.



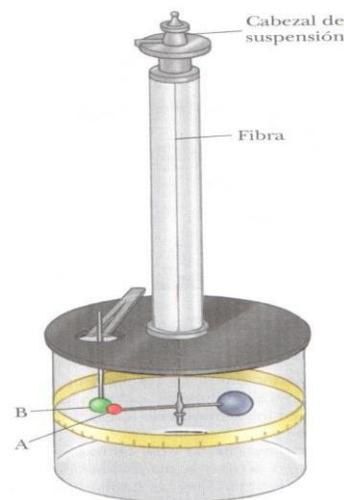
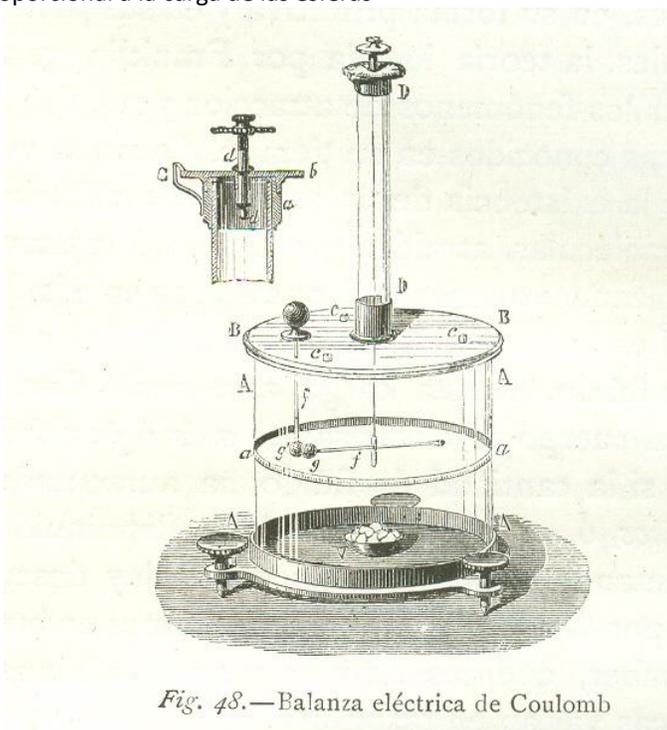
Al analizar un objeto X (en el dibujo es un libro) ubicado sobre una mesa, se descubre que sobre el mismo interactúan los dos tipos de fuerzas según el principio de Newton. Por un lado, la masa de la Tierra y su fuerza gravitatoria sobre el cuerpo en cuestión. Por el otro, la fuerza de contacto del objeto contra la mesa produciendo una reacción normal en sentido opuesto.



### 1.6.3 La ley de Coulomb.

Para mejor comprensión de los fenómenos eléctricos se utiliza el concepto de fuerzas a distancia junto con el concepto de **carga puntual**. El concepto de carga puntual representa cualquier cantidad de carga eléctrica localizada en un punto geométrico del espacio. Evidentemente, una carga puntual no existe, es una idealización, pero constituye una aproximación para estudiar la **interacción entre cuerpos cargados eléctricamente** cuyas dimensiones son muy pequeñas en comparación con la distancia que existen entre ellos.

En 1785 el físico francés Charles Coulomb (1736-1806), quien tras poner a punto un método de medida de fuerzas sensibles en pequeñas magnitudes, lo aplicó al estudio de las interacciones entre pequeñas esferas dotadas de carga eléctrica. El resultado final de esta investigación experimental fue la ley que lleva su nombre y que describe las características de las fuerzas de interacción entre cuerpos cargados. El dispositivo utilizado recibió el nombre de balanza eléctrica de torsión, constaba de dos esferas que se podían cargar, suspendidas de manera se pudiese medir el ángulo de torsión de la fibra que las mantenía suspendidas, en ángulo girado era proporcional a la carga de las esferas



La **Ley de Coulomb** enuncia que "**la fuerza** electrostática entre dos cargas puntuales es proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa, y tiene la dirección de la línea que las une. La fuerza es de repulsión si las cargas son de igual signo, y de atracción si son de signo contrario".

La descripción anterior se expresa simbólicamente como

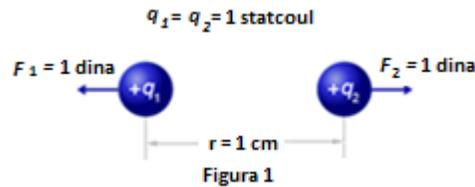
$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Finalmente, se introduce una constante de proporcionalidad para transformar la relación anterior en una igualdad:

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

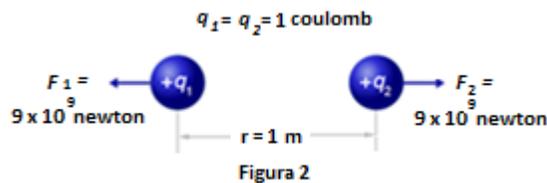
### 1.6.3 La unidad de carga eléctrica.

En el sistema de medidas cgs, la unidad de carga eléctrica es una unidad fundamental, denominada statcoulomb. En este sistema la constante K se le da valor igual a 1 ( $K = 1$ ). 1 statcoulomb queda determinado cuando se colocan dos cargas puntuales iguales, a una distancia de 1 cm y se produce una fuerza entre ellas de 1 dina.



Para el sistema de medidas SI, la unidad de carga es una unidad derivada, se le define en función de dos unidades fundamentales de este sistema, el amperio y el segundo: *1 coulomb es igual a la cantidad de carga eléctrica que pasa por un conductor en el tiempo de 1 segundo, cuando la intensidad de la corriente eléctrica es de 1 amperio.*

Como se ve en la figura 2, de acuerdo a la ley de Coulomb, dos cargas iguales a 1 C, situadas a una separación 1 m, producen la fuerza de repulsión igual a  $9 \times 10^9 \text{ N}$ . En este sistema, la constante K se le da valor igual a  $9 \times 10^9$  ( $K = 9 \times 10^9$ ).



La expresión actual de la ley de Coulomb, es

$$\vec{F} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

donde  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$  es la llamada permitividad del vacío y

K es la constante de Coulomb cuyo valor es  $8.98 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$ .

### 1.6.3 Carga eléctrica del electrón.

La cantidad de carga eléctrica del electrón (y del protón) en el sistema SI es:

$$\text{Carga del electrón } (-e) = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{Carga del protón } (+e) = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Aunque las cargas eléctricas del protón y electrón son las mismas, no ocurre lo mismo con sus masas. La masa del protón es mucho mayor que la del electrón:

$$\text{Masa del electrón: } 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\text{Masa del protón: } 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

#### 1.6.4 El concepto de campo.

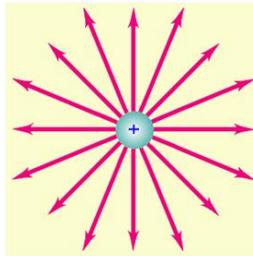
El concepto de **campo** se refiere a la representación o modelo de una magnitud física que modifica las propiedades de una región del espacio. Puede ser un ente<sup>46</sup> no visible pero sí medible, aunque con el tiempo su significado se ha extendido substancialmente.

En física el concepto fue introducido históricamente ante la necesidad de explicar la interacción a distancia (entre cuerpos en ausencia de contacto físico) y sin medios de sustentación para las posibles interacciones. En suma, para explicar la acción de las fuerzas de gravedad, eléctrica y magnética.

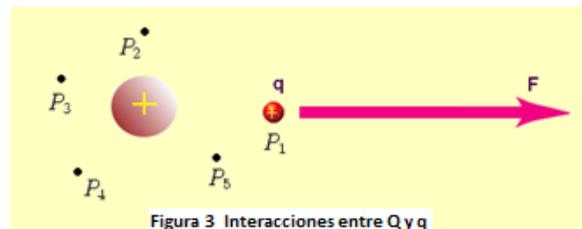
La *acción a distancia* se explica, entonces, mediante efectos provocados por la entidad causante de la interacción, sobre el espacio mismo que la rodea, permitiendo asignar a dicho espacio propiedades medibles. Así, será posible hacer corresponder a cada punto del espacio valores que dependerán de la magnitud del cuerpo que provoca la interacción y de la ubicación del punto que se considera.

#### 1.6.4 El campo eléctrico.

La presencia de una carga eléctrica  $Q$  en un punto, afecta al espacio que rodea a esa carga. La propiedad del espacio que se ve afectada se le llama *campo eléctrico*.



Considérese una carga  $Q$  fija en una determinada posición (ver figura 3). Si se coloca otra carga  $q$  en un punto  $P_1$ , a cierta distancia de  $Q$ , aparecerá una fuerza eléctrica actuando sobre  $q$ .



Si la carga  $q$  se ubica en otros puntos cualesquiera, tales como  $P_2$ ,  $P_3$ , etc., evidentemente, en cada uno de ellos, también estaría actuando sobre  $q$  una fuerza eléctrica  $F$ , producida por  $Q$ . Para describir este hecho, se dice que en cualquier punto del espacio en torno a  $Q$  existe un campo eléctrico originado por esta carga.

Obsérvese en la figura que el campo eléctrico es originado en los puntos  $P_1, P_2, P_3$ , etc., por  $Q$ , la cual, naturalmente, podrá ser tanto positiva (la de la figura) como negativa. La carga  $q$  que es trasladada de un punto a otro, para verificar si en ellos existe, o no, un campo eléctrico, se denomina carga de prueba.

El campo eléctrico puede representarse, en cada punto del espacio, por un vector, usualmente simbolizado por  $\vec{E}$  y que se denomina vector campo eléctrico.

El módulo del vector en un punto dado se denomina *intensidad del campo eléctrico* en ese punto. Para definir este módulo, considérese la carga  $Q$  de la figura, generando un campo eléctrico en el espacio que la rodea.

<sup>46</sup> Lo que es, existe o puede existir.

Colocando una carga de prueba  $q$  en un punto  $P_1$ , se verá que sobre ella actúa una fuerza eléctrica. La intensidad del campo eléctrico en  $P_1$  estará dada, por definición, por la expresión:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad \left( \frac{N}{C} \right) \quad (1)$$

La expresión anterior permite determinar la intensidad del campo eléctrico en cualquier otro punto, tales como  $P_2, P_3$ , etc. El valor de E será diferente para cada uno de ellos. La unidad de intensidad de campo eléctrico es

$$\frac{N}{C} \text{ (newton por culombio).}$$

De (1) obtenemos

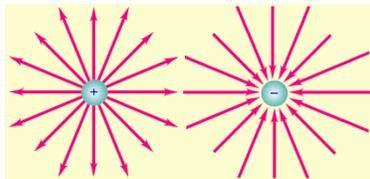
$$\vec{F} = \vec{E}q \quad (2)$$

lo cual significa que si se conoce la intensidad del campo eléctrico en un punto, es posible calcular, usando la expresión anterior, el módulo de la fuerza que actúa sobre una carga cualquiera ubicada en aquél punto.

### Representación gráfica del campo eléctrico

Una forma muy útil de esquematizar gráficamente un campo es trazar líneas que vayan en la misma dirección que dicho campo en varios puntos. Esto se realiza a través de las *líneas de fuerza*, líneas imaginarias que describen, si los hubiere, los cambios en dirección de las fuerzas al pasar de un punto a otro. En el caso del campo eléctrico, puesto que tiene magnitud y sentido se trata de una cantidad vectorial, y las líneas de fuerza o líneas de campo eléctrico indican las trayectorias que seguirían las partículas si se las abandonase libremente a la influencia de las fuerzas del campo. La línea de fuerza será tangente al campo eléctrico en cualquier punto considerado. Las líneas de fuerza tendrán las siguientes características:

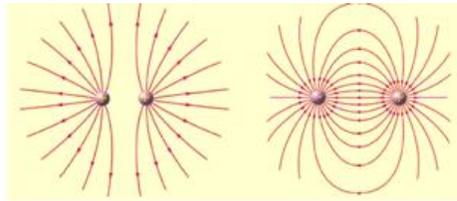
- A.- Por convención, las líneas deben partir de cargas positivas y terminar en cargas negativas y en ausencia de unas u otras deben partir o terminar en el infinito.



**Representación de campos eléctricos creados por cargas puntuales negativa y positiva.**

Una carga puntual positiva dará lugar a un mapa de líneas de fuerza radiales, pues las fuerzas eléctricas actúan siempre en la dirección de la línea que une a las cargas interactuantes, y dirigidas hacia fuera porque una carga de prueba positiva se desplazaría en ese sentido. En el caso del campo debido a una carga puntual negativa el mapa de líneas de fuerza sería análogo, pero dirigidas hacia ella ya que ese sería el sentido en que se desplazaría la carga positiva de prueba. Como consecuencia de lo anterior, en el caso de los campos debidos a varias cargas, las líneas de fuerza nacen siempre de las cargas positivas y por ello son denominadas manantiales y mueren en las negativas por lo que se les llama sumideros.

- B.- Las líneas de fuerza no pueden cruzarse.
- C.- El número de líneas fuerza que parten de una carga positiva o llegan a una carga negativa es proporcional a la cantidad de carga respectiva.
- D.- La líneas de fuerza deben ser perpendiculares a las superficies de los objetos en los lugares donde conectan con ellas.



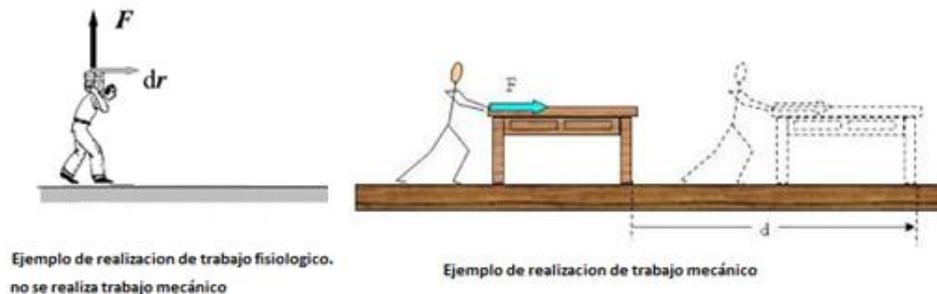
Representación del campo eléctrico creado por dos cargas positivas de igual magnitud y por un dipolo eléctrico.

### Trabajo mecánico y trabajo fisiológico.

Otro de los conceptos muy útiles y fundamentales de la Física es *energía*. Este concepto está ligado de tal modo con el de *trabajo* que es difícil entender claramente el concepto de *energía* sin haber definido antes lo que debemos entender por *trabajo* (a pesar de que históricamente el concepto de *energía* se vislumbró antes que el de *trabajo*).

#### 1.6.5 Concepto de Trabajo mecánico ( $W$ , por “work” en inglés).<sup>47</sup>

Conviene destacar que la definición de *trabajo* no corresponde al significado que comúnmente se le da a tal palabra, y ello puede dar lugar a confusiones.<sup>48</sup>



Para que se realice trabajo, desde el punto de vista de la Mecánica, es necesario:

- la aplicación de una fuerza  $F$  sobre un objeto o un sistema.<sup>49</sup>
- que el punto de aplicación de una fuerza experimente un desplazamiento en la misma dirección de la fuerza. El sentido de la fuerza hace que el trabajo se considere como positivo (coinciden el sentido de la fuerza aplicada y el desplazamiento) o negativo (el sentido de la fuerza aplicada y el desplazamiento están opuestos).

Finalmente, la definición de trabajo es

$$W = \vec{F} \cdot \vec{r}$$

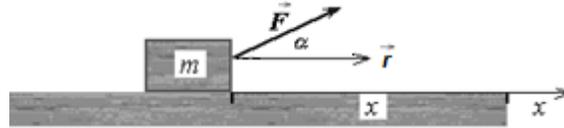
<sup>47</sup> El trabajo es una magnitud escalar.

<sup>48</sup> Cuando una persona soporta sobre sus espaldas un pesado fardo pero no lo desplaza en el sentido vertical, a pesar de la fatiga física que ello pueda representarle, no realiza trabajo desde el punto de vista de la Mecánica. Es más, incluso cuando la persona se desplace sobre un suelo horizontal, cargada con el fardo, no está *trabajando* (puesto que la fuerza, el peso, es perpendicular al desplazamiento) y, paradójicamente, cuando con gran esfuerzo baja con su carga por unas escaleras, la persona *recibe trabajo* (se realiza un trabajo negativo) en lugar de hacerlo ella. En realidad, la magnitud física relacionada con la *fatiga muscular* es la fuerza, no el trabajo. La definición de *trabajo*, aunque no está relacionada de un modo evidente con el *trabajo fisiológico*, está ligada con él mediante el concepto de energía, que como veremos es una consecuencia de la definición de *trabajo*; todo *trabajo fisiológico* implica el *consumo* de una cierta energía.

<sup>49</sup> Un sistema es una región del Universo sobre la que vamos a centrar nuestra atención. Se ignorarán los detalles acerca del resto del Universo exterior al sistema.

$$o \quad W = |\vec{F}| |\vec{r}| \cdot \cos \alpha$$

El trabajo  $W$  es una magnitud física escalar, obtenido del producto escalar de los vectores fuerza y desplazamiento.



$$W = F \cdot x \cdot \cos \alpha$$

De la expresión anterior, puede observarse que el trabajo puede ser cero, positivo o negativo, según sea el valor de  $\alpha$  ( $\alpha = 0$ ,  $\alpha < 90^\circ$  o  $\alpha > 90^\circ$ ). Una definición generalizada de trabajo, es

$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

La unidad de medida en el SI es dimensionalmente  $N \cdot m$  y se llama *Joule*, símbolo  $J$ .

### 1.6.6 Energía

El desarrollo histórico del concepto de energía fue lento, ya que debió transcurrir más de siglo y medio desde que se asomó hasta que se estableció en la forma en que lo conocemos actualmente. Las raíces de este concepto están en el siglo XVII. Fue Huygens<sup>50</sup> a quien lo vislumbró por primera vez. Actualmente, se define a la energía como

- Energía es la capacidad que tienen los cuerpos para producir trabajo.

A partir de esa definición podemos pensar en muchos sistemas materiales que *poseen energía*. Por ejemplo, a causa de encontrarse en movimiento, están: un automóvil, un proyectil, el agua que cae por una cascada, el viento poseen energía en el sentido de que tienen capacidad para realizar trabajo hasta que lleguen al reposo.

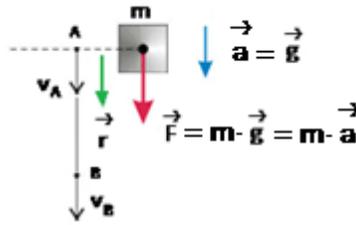
La energía que posee un sistema material en razón de encontrarse en movimiento recibe el nombre de *energía cinética* o de movimiento,  $E_c$ .

Pero también podemos identificar otros sistemas materiales que poseen energía a causa de su posición. Por ejemplo, un metro cúbico de agua situado en la parte superior de una presa tiene, como consecuencia de su posición, capacidad para realizar trabajo, moviendo la turbina situada en la parte inferior de la presa. Otro caso sería el subir un objeto de masa  $m$  a cierta altura en relación al suelo, lo cual implicaría la realización de un trabajo por medio de la aplicación de energía que sería proporcional a la altura que se lleve.

<sup>50</sup> Christiaan Huygens. (1629 - 1695) Matemático, astrónomo y físico holandés. En el campo de la mecánica publicó en 1673 su libro *El reloj de péndulo (Horologium oscillatorum)*; en él se halla la expresión exacta de la fuerza centrífuga en un movimiento circular, la teoría del centro de oscilación, el principio de la conservación de las fuerzas vivas (antecedente del principio de la conservación de la energía) centrándose esencialmente en las colisiones entre partículas (corrigiendo algunas ideas erróneas de Descartes) y el funcionamiento del péndulo simple y del reversible.

### 1.6.6 Cálculo de la energía cinética

Ejemplo. Calcular la *energía cinética*  $E_C$  en el punto B de la caída de una partícula  $m$  a partir del punto A, partiendo del reposo ( $V_A = 0$ ):



$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_A^B m \cdot \vec{a} \cdot d\vec{r} = m \int_A^B \frac{d(\vec{v})}{dt} \cdot d\vec{r} = m \int_A^B \vec{v} \cdot d\vec{v} \quad (14)$$

$$\text{Pero como } d(\vec{v} \cdot \vec{v}) = d(v^2) = 2 \cdot \vec{v} \cdot d\vec{v}$$

Entonces  $\vec{v} \cdot d\vec{v} = \frac{1}{2} \cdot d(v^2)$  y la expresión (14) se transforma en

$$W_{AB} = \frac{1}{2} m \int_A^B d(v^2) = \frac{1}{2} m v^2 \Big|_A^B = \frac{1}{2} m v_B^2 - \frac{1}{2} m v_A^2 \quad (17)$$

Si  $v_A = 0$

$$W_{AB} = \frac{1}{2} m v_B^2$$

La energía cinética de una partícula es una magnitud física escalar, esencialmente positiva, que se mide, obviamente, con las mismas unidades que el trabajo esto es, en joules ( J ) en el sistema (SI) y en ergs (erg) en el sistema cgs.

### 1.6.6 Cálculo de la Energía potencial.

La energía que posee un objeto o un sistema en razón de su posición, se denomina *energía potencial*,  $E_C$ .

El cambio de energía potencial es el resultado de la realización de un trabajo. Así, en el caso del metro cúbico de agua, la energía potencial la adquiere mediante el trabajo que se realiza para elevarlo hasta la parte superior de la presa.

Estas observaciones nos sugieren la posibilidad de definir operativamente el concepto de energía, a través del trabajo que se ha realizado previamente sobre el cuerpo o sistema material.

Este tipo de campo, se le considera conservativo porque sólo depende de las posiciones extremas, A y B, de la partícula y no del camino recorrido por ésta. Es decir, podemos expresar el trabajo realizado como la diferencia de valores de energía en los extremos de la trayectoria. Dicha función recibe el nombre de energía potencial y la designaremos por  $E_p$  de modo que

$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} = [E_p(B) - E_p(A)]$$

$$E_p(B) = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} + E_p(A)$$

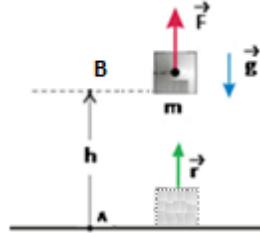
La energía potencial de una partícula en un campo es una función escalar de las coordenadas de la posición que ocupa, de tal modo que el trabajo realizado (o recibido) por el campo durante un desplazamiento de la partícula es igual a la diferencia de valores de la energía potencial en la posición inicial y en la posición final. En física, un campo de fuerzas es **conservativo** si el trabajo total realizado por el campo sobre una partícula que realiza un desplazamiento no importa de la trayectoria que se siga.

Si  $E_p(\mathbf{A}) = 0$ , entonces

$$E_p(\mathbf{B}) = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

Evidentemente, la energía potencial tiene las mismas dimensiones que el trabajo, y se medirá en las mismas unidades que éste.

**Ejemplo.** Determinar la expresión para calcular el valor de la energía potencial de la partícula  $m$  cuando se le mueve del  $\mathbf{A}$  al punto  $\mathbf{B}$ . La energía potencial en  $\mathbf{A}$  ( $E_p(\mathbf{A}) = 0$ ).



$$E_p(\mathbf{B}) = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

$$E_p(\mathbf{B}) = \int_A^B (\vec{F}) \cdot d\vec{r} = \int_A^B (m \cdot \vec{g}) \cdot d\vec{r} = (m \cdot g) \int_A^B dr = m \cdot g \cdot r \Big|_A^B$$

$$E_p(\mathbf{B}) = m \cdot g [r_B - r_A]$$

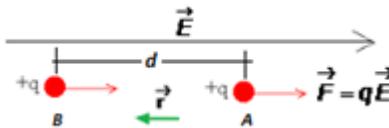
$$E_p(\mathbf{B}) = m \cdot g \cdot h$$

### 1.6.6 Energía potencial eléctrica.

Análogamente que en el caso mecánico, en el contexto eléctrico las partículas son cargas eléctricas  $q$  y las fuerzas eléctricas son producidas por campos eléctricos.

Considérese una carga eléctrica puntual  $+q$  en un punto  $\mathbf{A}$  en presencia de un campo eléctrico constante  $\vec{E}$ .

La carga experimenta una fuerza eléctrica  $\vec{F} = q\vec{E}$ :



Al trasladar la carga  $q$  de un punto  $\mathbf{A}$  a otro  $\mathbf{B}$  en contra la fuerza  $\mathbf{F}$  se realizará un trabajo  $W$ .

El trabajo total realizado por el campo eléctrico es:

$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int_A^B q \vec{E} \cdot d\vec{l} = q \cdot E \int_A^B dl = q \cdot E(B-A)$$

Por lo que se ha realizado un trabajo igual a

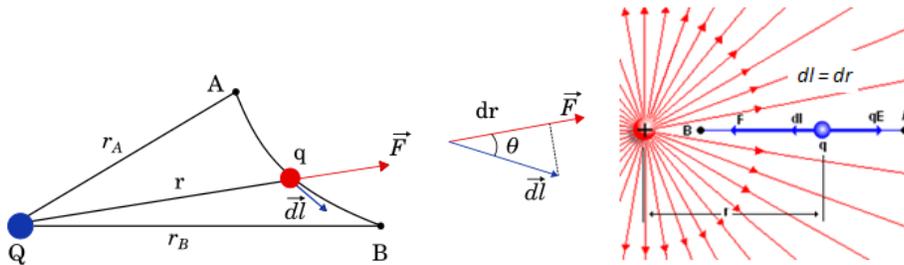
$$W = q \cdot E \cdot d \quad (J) \text{ Joules.}$$

O interpretado de otra forma, la carga eléctrica tiene una energía potencial igual a

$$EP_B = q \cdot E \cdot d \quad (J) \text{ Joules.}$$

El valor de la energía potencial positivo indica que ese punto del campo está capacitado a realizar un trabajo.

**Un caso particular.**



**Figura 1**

Sea una carga puntual  $q$  que recorre una determinada trayectoria **A - B** en las inmediaciones de una carga  $Q$  tal y como muestra la figura 1. Siendo  $dr$  la diferencial del desplazamiento infinitesimal de la carga  $q$  en la dirección radial, el trabajo diferencial  $dW$  se puede expresar así:

$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int_A^B F \cdot dl \cdot \cos(\theta) = \int_A^B F \cdot dr$$

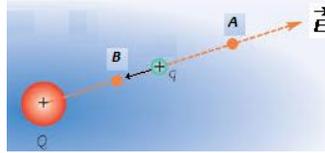
Para calcular el trabajo total, se integra entre la posición inicial A, distante  $r_A$  de la carga  $Q$  y la posición final B, distante  $r_B$  de la carga  $Q$  :

$$W = \int_{r_A}^{r_B} F \cdot dr = \int_{r_A}^{r_B} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2} \cdot dr = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad (5)$$

$$EP_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{Qq}{r} \right) \quad \text{si} \quad r_B \rightarrow \infty \quad (J) \text{ Joules.}$$

### 1.6.7 Diferencia de Potencial eléctrico de un campo (Voltaje).

Cuando se usa el concepto **diferencia de potencial eléctrico** se hace referencia a una propiedad del campo eléctrico en el que se mueven de las cargas eléctricas.



Se explicado que mover la carga  $q$  del punto A al punto B, requiere realizar un trabajo  $W$  (se utiliza cierta cantidad de energía  $W$ ).

La **diferencia de potencial eléctrico** se determina dividiendo la cantidad de trabajo  $W$  entre la cantidad de carga  $q$ . Para determinar la diferencia de potencial entre los puntos A y B de un campo electrostático, primero hay que determinar cuánta energía o trabajo gana (o pierde) la carga  $q$  al movilizarla del punto A hacia otro B, luego dividir ese valor entre cada unidad de carga positiva desplazada.

Por lo tanto, se dice que, **diferencia de potencial eléctrico** es la cantidad de trabajo por unidad de carga que una fuerza externa emplea para mover una carga desde un punto inicial a otro final de un campo eléctrico  $E$ . Es por ello, que este concepto se le identifica también como *fuerza electromotriz*<sup>51</sup> (fem).

### 1.6.7 La unidad para el potencial eléctrico.

La unidad para el potencial eléctrico en el sistema S.I. es Joule/Coulomb (J/C), y en honor al físico Alessandro Volta,<sup>52</sup> esta unidad se le denomina Volt (V). El instrumento para medir la diferencia de potencial se llama voltímetro

Lo anterior queda expresado matemáticamente por:

$$V_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} \text{ Volts}$$

Dado que

$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int_A^B q\vec{E} \cdot d\vec{l} = q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Entonces

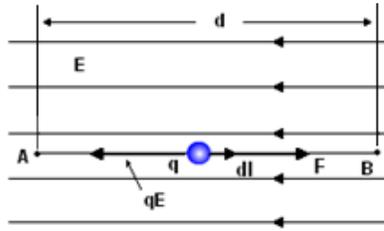
$$V_{AB} = \frac{q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}}{q} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Si  $E = \text{constante}$

$$V_{AB} = E \cdot (B - A) = E \cdot d$$

<sup>51</sup> Existe el conflicto en el uso de la nominación fuerza electromotriz para este concepto, debido a que el término es un nombre inapropiado, ya que las unidades de este concepto no es de fuerza, sino joules/coulomb (voltio).

<sup>52</sup> A fines del siglo XVIII, el físico italiano ALESSANDRO VOLTA (1745–1827) inventó uno de los dispositivos más importantes de la electricidad, capaz de transformar reacciones químicas de metales y líquidos en energía eléctrica, a los que se los denominó *PILA*. La pila es un elemento eléctrico que puede mantener una diferencia de potencial constante entre sus terminales o electrodos de salida.



El valor de  $V_{AB}$  es la **diferencia de potencial eléctrico** o **potencial electrostático** entre dos puntos del campo eléctrico. Por acuerdo, si selecciona al punto B, situado en tierra,  $V_B = 0$  como una referencia convencional de potencial eléctrico, entonces se dice que el punto A tiene un potencial eléctrico  $V_A$ .

El potencial  $V_{AB}$  puede ser positivo, negativo o nulo. En estos casos el potencial eléctrico en **A** será respectivamente mayor, menor o igual que el potencial eléctrico en **B**.

**Ejemplo.** Hallar el trabajo que se obtiene al mover 10 C de carga eléctrica a través de una diferencia de potencial de

- a) 1.5 V y, b) 12 V.

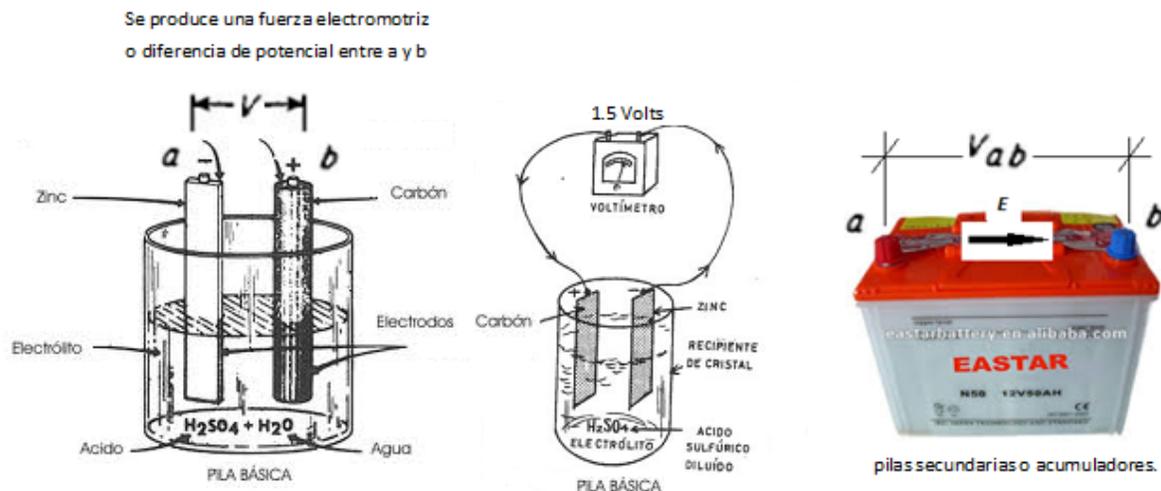
$$V_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} \rightarrow W_{AB} = q \cdot V_{AB}$$

a)  $W_{AB} = (10 \text{ C}) \cdot (1.5 \text{ V}) = 15 \text{ J}$

b)  $W_{AB} = (10 \text{ C}) \cdot (12 \text{ V}) = 120 \text{ J}$

Mayor diferencia de potencial produce mayor cantidad de trabajo.

### 1.6.8 La pila eléctrica de Volta.



La pila eléctrica es un dispositivo que convierte la energía química en eléctrica, consisten en un electrolito<sup>53</sup> (que puede ser líquido, sólido o en pasta), un electrodo positivo (el carbón) y un electrodo negativo (Zinc). Uno de los electrodos produce electrones y el otro electrodo los recibe. Al conectar los electrodos al circuito que hay que alimentar, llamado carga, se produce una corriente eléctrica. Las pilas en las que el producto químico no puede volver a su forma original una vez que la energía ha sido convertida (es decir, que las pilas se han

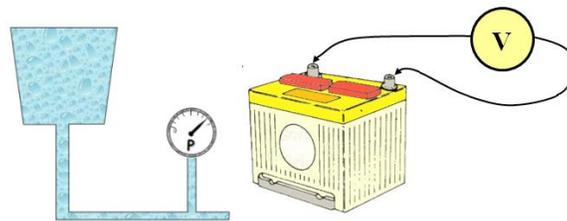
<sup>53</sup> Dependiendo del material del que estén contruidos los electrodos y de las sustancias que formen el electrolito tenemos los diferentes tipos de baterías. Por ejemplo: las baterías de plomo que se utilizan en automóviles, tienen un electrodo de plomo puro, el otro electrodo es de dióxido de plomo y el electrolito es ácido sulfúrico disuelto en agua.

descargado), se llaman pilas primarias o voltaicas. Las pilas en las que el producto químico puede ser reconstituido pasando una corriente eléctrica a través de él en dirección opuesta a la operación normal de la pila, se llaman pilas secundarias o acumuladores.

Cuando la batería está cargada, existe un campo eléctrico entre sus terminales, con dirección del borne cargado (+) al borne cargado (-). Si se hace una conexión exterior entre ellos, ya sea por medio de un conductor o cualquier aparato, circulará una corriente eléctrica del borne (-) al borne (+). Ocurre que los electrones ganados por la terminal (-) se desplazan (exteriormente) a la otra terminal que perdió electrones (+). Ese movimiento de electrones a través del aparato que estemos usando retorna electrones al electrodo que los había perdido, pero debido a la energía química del electrolito, el proceso de oxidación-reducción<sup>54</sup> se repite (electrones de la terminal (+) a la terminal (-) interiormente en la batería) hasta que los materiales de la batería se degraden.

En conclusión: La batería no “acumula” electricidad, sino que mantiene una diferencia de potencial constante entre sus electrodos. Durante la carga, la energía eléctrica producida por un alternador (o generador), se convierte en energía química dentro de la batería. Cuando la batería entrega corriente, la energía química se convierte en energía eléctrica.

### 1.6.9 Analogía entre diferencia de potencial eléctrica e hidráulica.

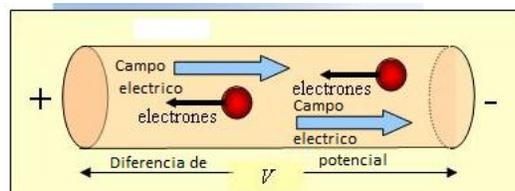


Comparando el término diferencia de potencial eléctrico con un circuito hidráulico, el potencial eléctrico correspondería a la presión que posee un fluido que hace que éste se desplace por un conducto.

**El potencial eléctrico (o la diferencia de potencial) viene a ser lo que la presión en Mecánica. La diferencia de presión hidráulica entre los extremos de una tubería da lugar o tiende a originar el flujo del agua. La presión en el fondo de un tinaco tiende a originar el flujo de agua a través de la tubería y continuar a otro desagüe. La presión en una caldera hace que el vapor circule a través de conducciones, válvulas, etc. Análogamente, la presión eléctrica o diferencia de potencial tiende a producir una corriente eléctrica.**

### 1.6.10 La corriente eléctrica

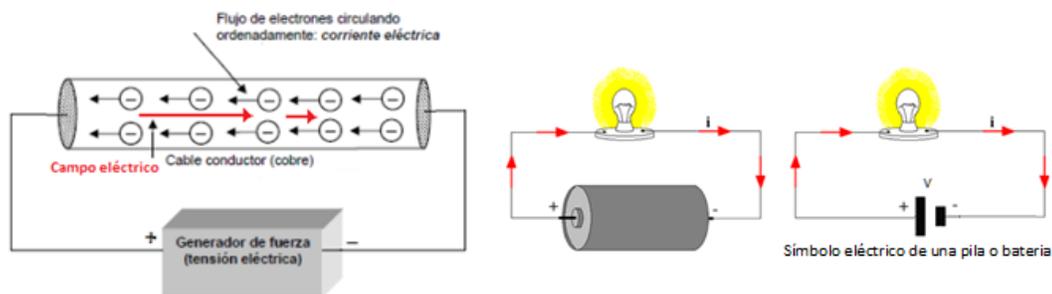
La corriente eléctrica es el movimiento o la circulación de cargas eléctricas a través de cualquier medio, provocada por la existencia de campo eléctrico. Como consecuencia del campo, existirá diferencias de potencial en cualquiera de dos puntos de él, tal como se ha explicado anteriormente. Además, para producirse una corriente en forma continua, es necesario que dicho desplazamiento de cargas se realice a través de una trayectoria cerrada, conocida como circuito eléctrico



<sup>54</sup> Por medio de una reacción química se produce una acción de oxidación en uno de los electrodos (por la pérdida de electrones, se carga positivamente) y en el otro una acción de reducción (gana todos los electrones que el otro electrodo pierde, se carga negativamente).

Todos los circuitos eléctricos disponen de una serie de componentes básicos, de manera que se obtenga el paso de una corriente eléctrica a través del dispositivo de salida que se necesite. En principio, para que exista una circulación de corriente eléctrica se necesita que el circuito esté cerrado. O sea, desde un punto de salida de un generador de energía eléctrica, la corriente debe entrar por la línea de conducción, cables, después pasar por algún tipo de dispositivo receptor que sea (bombilla, motor, etc.), debe retornar al otro punto del generador; cualquier tipo de interrupción, corte, en cualquier punto de la línea, hace que se interrumpa la circulación de corriente y que por tanto el dispositivo receptor deje de recibir energía eléctrica.

El circuito eléctrico más elemental es el que se muestra en la figura 1.12; se basa en un generador de fuerza electromotriz (puede ser una batería), las líneas conductoras y el receptor de la energía eléctrica. Al cerrarse el circuito, se unen los terminales del generador a través de algún elemento conductor, y ello da lugar a que circule una corriente eléctrica a través de la línea conductora.



**Representación del concepto de corriente eléctrica a través de un circuito.**

La intensidad de corriente eléctrica es un concepto que relaciona la cantidad de carga eléctrica que se desplaza y el tiempo, y se puede definir de la siguiente manera:

La existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, permite establecer una corriente eléctrica entre ambos y obtener un trabajo. La energía eléctrica puede transformarse en muchas otras formas de energía, tales como la energía luminosa o luz, la energía mecánica y la energía térmica.

La energía eléctrica se manifiesta como corriente eléctrica, es decir, como el movimiento de cargas eléctricas negativas, o electrones, a través de un cable conductor metálico como consecuencia de la diferencia de potencial que un generador o batería esté aplicando en sus extremos.

### 1.6.11 Intensidad eléctrica:

Es la cantidad de carga eléctrica que circula por un conductor por cada unidad de tiempo. Matemáticamente se expresa por:

$$I = \frac{q}{t}$$

Donde  $q$  = cantidad de carga en coulombs (C).

$t$  = tiempo en segundos (s).

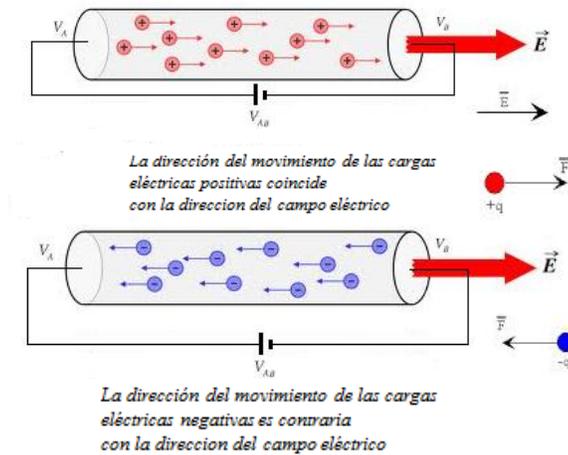
### 1.6.11 La unidad de intensidad de corriente.

En el S.I. a la unidad de intensidad de corriente se le llama Amper (A). Circula la corriente de un amper cuando por el circuito pasa un culombio por cada segundo. Otras magnitudes para medir la corriente eléctrica:

Cantidad	Abreviatura	Notación decimal	Notación exponencial
1 miliamper	1 mA	0.001 A	$1 \times 10^{-3}$ A
1 microampere	1 $\mu$ A	0.000001 A	$1 \times 10^{-6}$ A
1 nanoamper	1 nA	0.000000001 A	$1 \times 10^{-9}$ A
1 picoamper	1 pA	0.000000000001 A	$1 \times 10^{-12}$ A

### 1.6.12 Los dos tipos de corriente eléctrica de acuerdo a su carga eléctrica.

Si partimos de la idea que la corriente eléctrica es el movimiento de cargas eléctricas dentro de un conductor o un circuito eléctrico cerrado por consecuencia de una diferencia de potencial (producido por un campo eléctrico) y que las cargas eléctricas son de dos tipos, negativas (los electrones) o positivas (los protones), habría que suponer la existencia de dos tipos de corriente eléctrica.



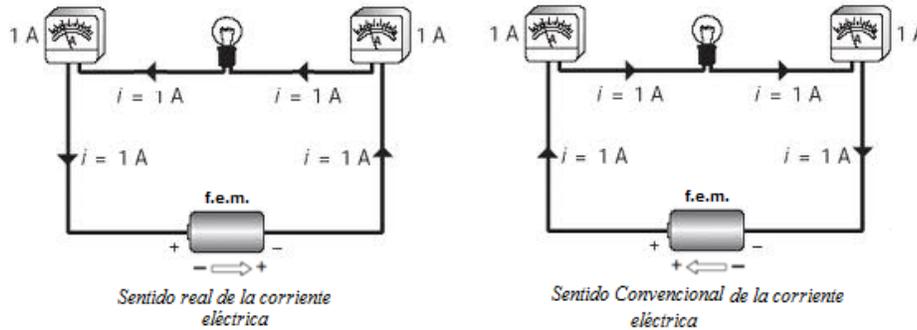
La figura 6.1 ofrece una descripción del movimiento de los dos tipos de carga con igual posibilidad de movilidad, las cargas positivas y las cargas negativas. Esta explicación fue válida hasta finales del siglo XIX cuando aun no se conocía la estructura atómica. Es más, los físicos de ese siglo supusieron que lo que se movía en un circuito eran las cargas positivas y este movimiento de cargas iba de un punto del campo eléctrico de mayor potencial ( $V_A$ ) a otro de menor ( $V_B$ ). Se decía que la corriente eléctrica iba del potencial + al potencial -.

Con el conocimiento actual de la física del átomo, se afirma que las únicas cargas que se pueden desplazar son los electrones debido a la posición que ocupan en el átomo y a su masa mucho menor que la del resto del átomo. Así los protones se quedan fijos en los núcleos atómicos, mientras que los electrones, más libres que los otros componentes nucleares, se desplazan de un lugar a otro. Se comprobó que en sólidos metálicos, como los cables, las cargas positivas no se mueven y solamente lo hacen las negativas, esto es los electrones.

Así, la definición de corriente eléctrica que se tenía como el flujo de cargas positivas no fue posible cambiarla por la nueva definición dada por teoría moderna ya que el anterior concepto estaba muy arraigado a las explicaciones del mundo científico de ese momento. Debido a esa férrea tradición, los físicos acordaron aceptar el término de "sentido convencional", que se refiere a considerar la circulación de la corriente eléctrica como si fuera debida al flujo de cargas positivas (en vez del sentido real de las cargas negativas, o de electrones libres) desde el polo positivo al negativo.

### 1.6.12 Sentido electrónico real y convencional de la corriente eléctrica.

Con fundamento en los principios y la acción del campo eléctrico entre los bornes del generador de f.e.m., el sentido de la corriente de los electrones, externamente, va de negativo (-) a positivo (+); o sea, el flujo de electrones parte del polo negativo del generador y se dirige, a través de las líneas de conducción, hacia el polo positivo del generador. Por dentro del generador, el flujo electrónico circula desde el polo positivo al negativo. Este sentido, de negativo a positivo, es el *sentido electrónico real* (fig.1.12).



1.12 Sentido real y convencional de la corriente eléctrica.

Se considera el *sentido convencional de la corriente*, que va al revés del sentido real; o sea, de *positivo (+) a negativo (-)*, según se representa en la figura 1.12. Esto es así porque en los principios del descubrimiento de la electricidad, al desconocerse la existencia de los electrones se creía que la corriente eléctrica era producida por el movimiento de cargas positivas y que éste era el sentido real de la corriente, y así se consideró durante mucho tiempo. Pero los posteriores descubrimientos demostraron que realmente el sentido era al revés. No obstante, ese error no influye para nada en la práctica, por lo que los científicos convinieron seguir utilizando ese sentido de la corriente eléctrica convencionalmente para no modificar los principios y leyes anteriormente estudiados con respecto a la consideración de que la corriente eléctrica era de cargas positivas.

### 1.6.13 Corriente eléctrica directa (c.d.).

Se denomina, en general, corriente directa al flujo de cargas eléctricas que no cambia el sentido de la corriente con el tiempo. Cuando hay corriente directa en un dispositivo, sus terminales con mayor y menor potencial no se intercambian entre sí. Es directa toda corriente cuyo sentido de circulación es siempre el mismo, independientemente de su valor absoluto.

Uno de los elementos principales de todo circuito eléctrico es el generador de la fuerza electromotriz de las cargas (fem). Las pilas y baterías generan f.e.m. directa y continua; esto significa que el sentido de la diferencia de potencial de ellas, el voltaje, no cambia. Por ello, el sentido de la corriente producida por una batería es corriente directa, no cambia de sentido; además, es corriente continua ya que su intensidad es constante. Su descubrimiento se remonta a la invención de la primera pila voltaica por parte del científico italiano Alessandro Volta. A partir de los trabajos de Edison sobre la generación de electricidad, en las postrimerías del siglo XIX, cuando la corriente continua comenzó a emplearse para la transmisión de la energía eléctrica.

En la figura 6.2 se representa la simbología de un generador de c.c. en general, el de una pila y la representación gráfica de la corriente continua. Ya en el siglo XX este uso decayó en favor de la corriente alterna, que presenta menores pérdidas en la transmisión a largas distancias. Actualmente se está extendiendo el uso de generadores de corriente continua a partir de celdas fotoeléctricas que permiten aprovechar la energía solar.

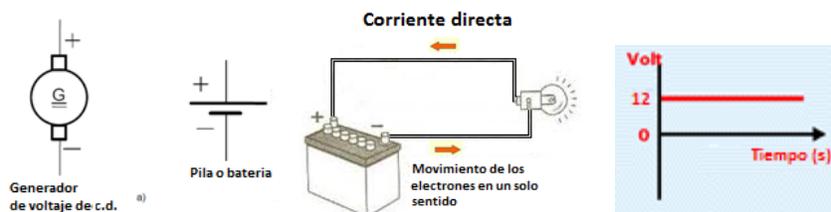


Figura 6.2. Gráfica de una corriente directa (C.D.) continua (C.C.).

#### 1.6.14 Corriente alterna (c.a.).

La alternancia de la corriente eléctrica se da cuando la corriente circula durante un tiempo en un sentido y después en sentido opuesto, volviéndose a repetir este proceso en forma constante. De otra forma, la c. a. consiste en un movimiento oscilatorio de los electrones, se le conoce como corriente alterna (en castellano, por la abreviatura c.a. y en inglés, por a.c.). Los electrones no se desplazan a lo largo del hilo conductor y simplemente oscilan respecto a un punto debido a la presencia de una diferencia de potencial que invierte su polaridad se periódicamente. En el caso del voltaje de la red eléctrica doméstica es de 120 V y 60 Hz, es producida en las grandes plantas generadoras denominadas hidroeléctricas; en este caso, la polaridad del voltaje cambia periódicamente, y lo hace 60 veces por segundo. En la figura 5.3 se muestra la corriente producida por la aplicación de una fem de c.a.

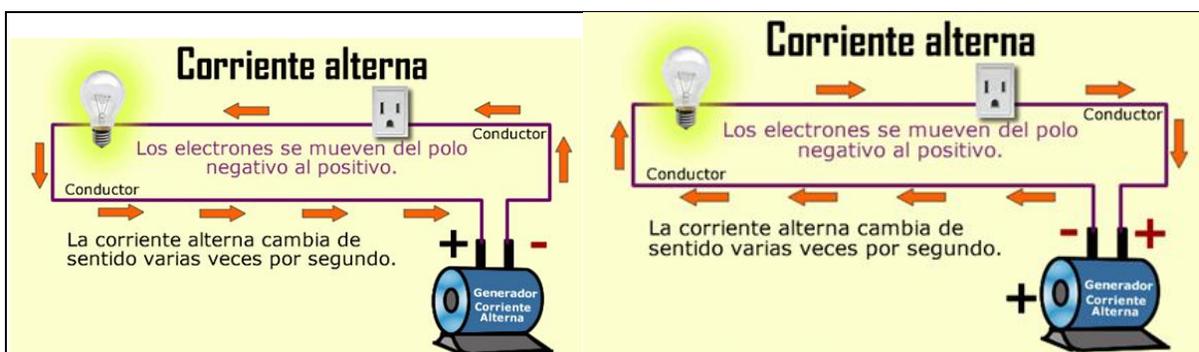


Figura 5.3. Corriente alterna

La oscilación de la corriente alterna más común es la oscilación senoidal, a tal punto que al hablar de corriente alterna se sobrentiende que se refiere a este tipo.

#### 1.6.15 Principio de generación de la corriente alterna senoidal.

Este tipo de corriente la produce un dispositivo eléctrico denominado generador de corriente alterna, que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. El generador más simple consta de una espira rectangular que gira en un campo magnético uniforme. El movimiento de rotación de las espiras es producido por el movimiento de una turbina accionada por una corriente de agua en una central hidroeléctrica, o por un chorro de vapor en una central térmica. En el primer caso, una parte de la energía potencial agua embalsada se transforma en energía eléctrica; en el segundo caso, una parte de la energía química se transforma en energía eléctrica al quemar carbón u otro combustible fósil.

El principio de funcionamiento está basado en el fenómeno de inducción electromagnética, descubierto por Faraday en el año 1830, quien demostró que "cuando un conductor se mueve dentro de un campo magnético cortando líneas de fuerza, se engendra en él una fuerza electromotriz, que es directamente proporcional al flujo cortado, e inversamente proporcional al tiempo empleado en hacerlo.

Por ello, si se tiene un imán permanente como inductor estático y un rotor con una espira como inducido tendremos un generador elemental. Cuando una espira gira, como se muestra en la figura 5.5, el flujo del campo magnético a través de la espira cambia con el tiempo. Los extremos de la espira se conectan a dos anillos que giran con la espira, tal como se ve en la figura. Las conexiones al circuito externo se hacen mediante escobillas (carbones) estacionarias en contacto con los anillos.

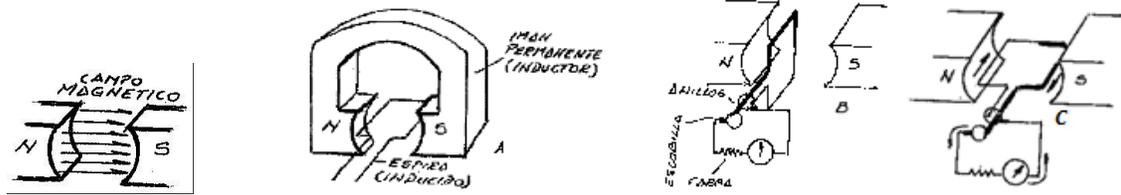
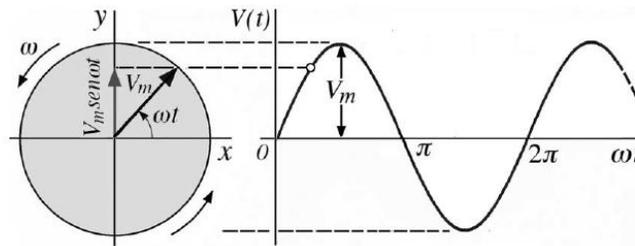
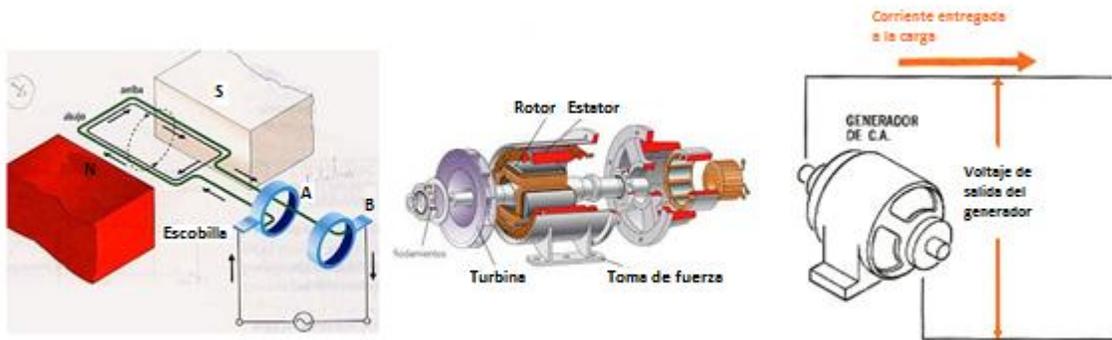


Figura 5.5.



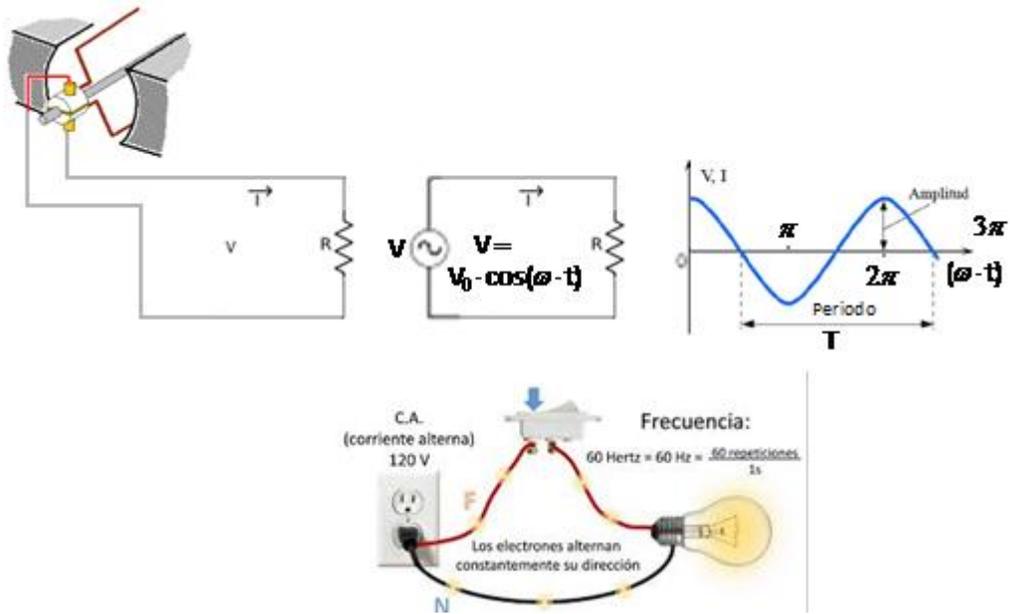
Al producirse el movimiento, la espira cortará las líneas de fuerza y se producirá una fuerza electromotriz. A medida que la espira va girando, ésta va cortando las líneas de fuerza, con un ángulo y posición distinta generando una diferencia de potencial que alterna su polaridad y con intensidad es variable.

En la figura 5.5.A la espira está en posición paralela a las líneas de fuerza, sin generar voltaje en sus extremos. A medida que la espira avanza, ésta se va desplazando a diferentes ángulos, generando paulatinamente un voltaje en sus extremos. Llega a la posición que se ve en la figura 5.5.B, en donde la espira se encuentra perpendicular a las líneas de fuerza cortando a estas "más efectivamente" generando el máximo (o pico) del valor del voltaje. A medida que el rotor sigue girando este llega a una posición, a 180° del inicio, en donde la espira se encuentra nuevamente paralela a las líneas de fuerza, sin generar tensión. Al seguir su giro la espira, de nuevo incrementa su efectividad de corte de líneas de campo, hasta llegar a un valor máximo, generando un valor pico, pero en sentido negativo. Finalmente, el rotor sigue girando, éste llega a una posición a 360° del inicio, donde la espira está paralela a las líneas de fuerza nuevamente, con una inducción de voltaje nula. A partir de este punto, la espira cumple un ciclo, por lo que empezará a repetir periódicamente su recorrido.



Principio de funcionamiento de un generador de c.a.

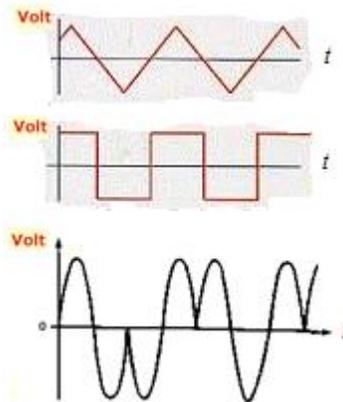
La compañía pionera en la producción y el transporte a larga distancia de electricidad de alta tensión de c.a. fue la Westinghouse Electric, compañía fundada en 1886 como *Westinghouse Electric Company* y después renombrada como *Westinghouse Electric Corporation* por George Westinghouse.



Así, en los circuitos de f.e.m. de voltaje alterno la corriente circula invirtiendo el sentido frecuentemente. En los circuitos con f.e.m. de voltaje continuo la corriente circula siempre en el mismo sentido, alimentados en algunos casos por una batería.

### 1.6.16 Otros tipos de corriente alterna.

En la figura 5.3, se pueden observar algunos ejemplos de distintos tipos de corriente alterna periódica. Desde luego, la más conocida es la corriente alterna sinusoidal.



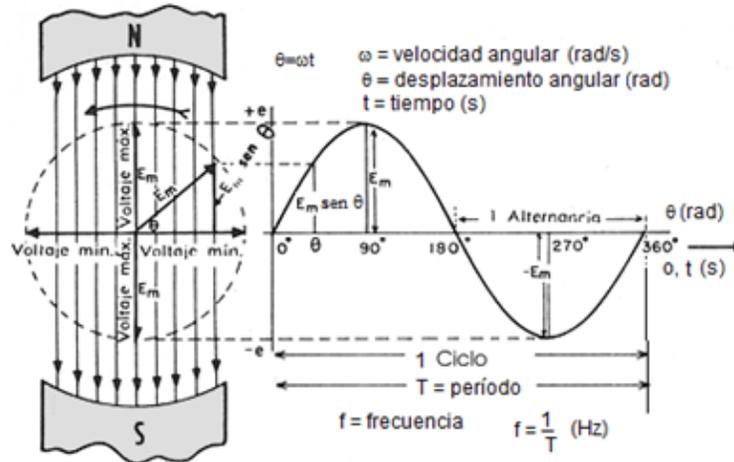
## 1.7 CARACTERÍSTICAS DE LA CORRIENTE ALTERNA SINUSOIDAL.

Los rotores de los **generadores de c.a.** giran a gran velocidad, la cual se expresa en unidades de radianes/segundo (rad/s). Este movimiento induce la generación de una diferencia de potencial variable ( $E_m$ ) en los devanados de las bobinas como se describe en la figura 6.4.

La fuerza electromotriz ( $fem$ ) varía con el tiempo en forma sinusoidal de acuerdo a la expresión:

$$e = E_m \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

Donde  $E_m$  es el voltaje máximo o valor pico (figuras 5.5, 5.6 y 5.7) y  $\omega = 2\pi \cdot f$  es la frecuencia o velocidad angular, siendo  $f$  la frecuencia expresada en Hertz.



**Generador de c.a.**

Fig. 6.5 El generador de c.a. y características de la corriente alterna periódica

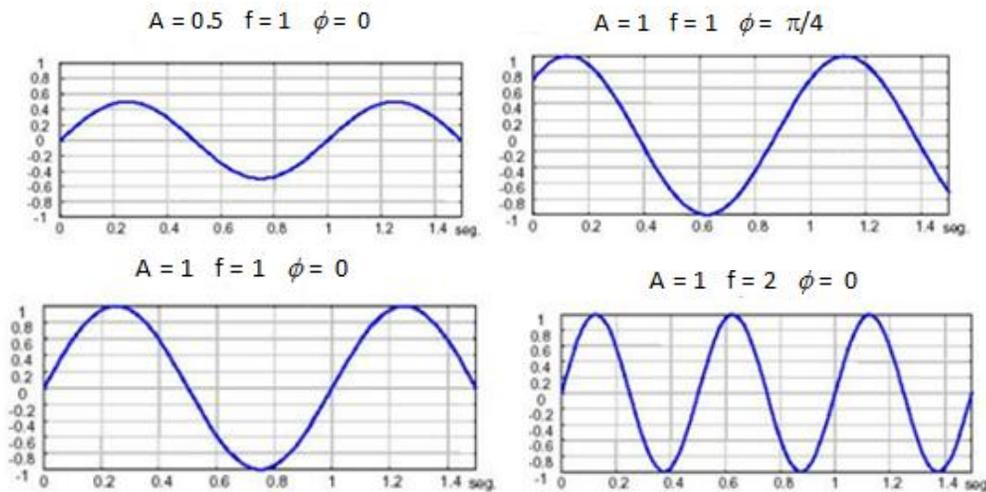


Fig. 6.6 Diferentes valores de las principales características de una corriente alterna sinusoidal: amplitud, frecuencia y fase.

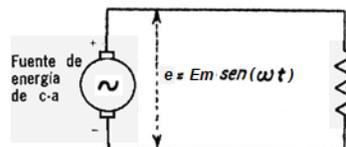


Fig. 6.7 Símbolo del generador de c.a. en un circuito y la expresión matemática de la señal de c.a.

### 1.7.1 Corriente directa pulsante.

La corriente directa pulsante es una corriente que sufre cambios regulares de magnitud a partir de un valor constante. Estos cambios o pulsos son siempre en el mismo sentido de la corriente.

Un ejemplo muy útil y común es la cd pulsante obtenida de un circuito rectificador de corriente alterna (c.a.). La corriente se denomina c.d. pulsante de media onda u de onda completa.

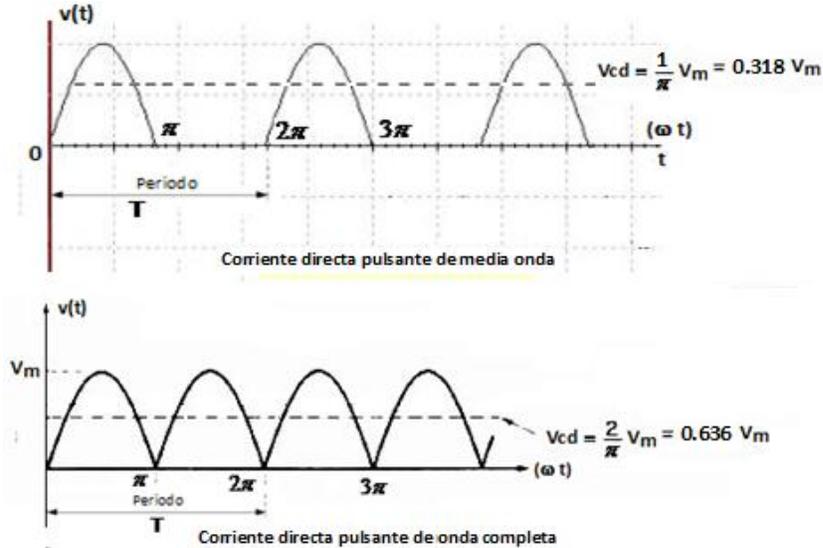


Fig. 5.8 Tipos de corriente directa pulsante.

### 1.7.2 Corriente directa compuesta o mixta.

Este tipo de corriente eléctrica se produce en los circuitos que tienen las dos fuentes de energía, es decir, una tipo directa y otra tipo alterno. Al valor medio de la señal se le llama componente de c.d. continua, mientras que la oscilación recibe el nombre de componente de corriente alterna.

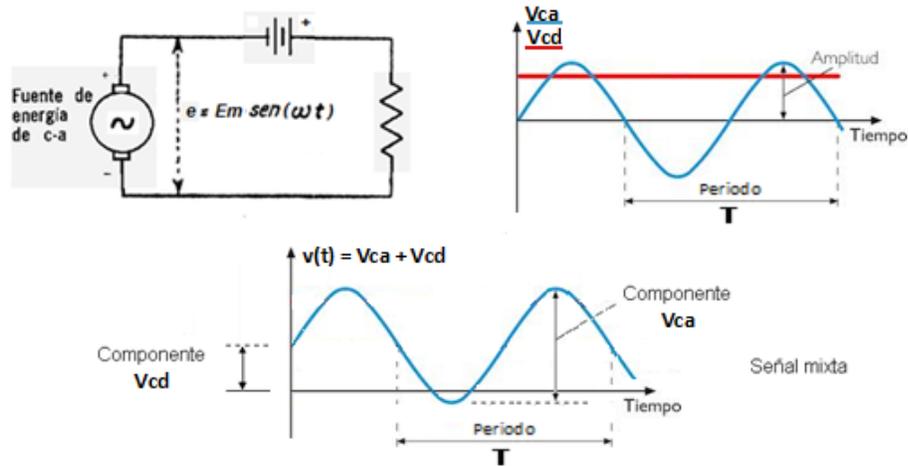


Fig. 6.9 Tipos de corriente directa pulsante.

## 1.8 CLASIFICACIÓN DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA DE ACUERDO AL TIPO DE INFORMACIÓN. (SEÑALES ELÉCTRICAS<sup>55</sup>)

Una **señal** es un signo<sup>56</sup>, un gesto que informa o avisa de algo. La señal sustituye por lo tanto a la palabra escrita o al lenguaje. Ellas obedecen a convenciones o normas, por lo que son fácilmente interpretadas.



Fig. 6.10 Señales utilizadas en vialidad.

Cuando se trata de símbolos físicos, las señales están colocadas en lugares visibles y están realizadas normalmente en diversos colores y formas. En el caso de los gestos, son hechas por las personas mediante las manos y los brazos. También hay indicaciones consistentes en banderas, utilizadas sobre todo en la navegación marítima, y señales luminosas, como las de los faros en las costas.

Así mismo, una **señal eléctrica** puede ser también la variación de una corriente eléctrica u otra magnitud física que se utiliza para transmitir información.

Por ejemplo, en 1876, tras haber descubierto que para transmitir voz humana sólo se podía utilizar una corriente directa continua, el inventor escocés nacionalizado en EE. UU. Alexander Graham Bell, construyó y patentó el primer teléfono capaz de transmitir y recibir voz humana con toda su calidad y timbre. Otro ejemplo del empleo de la corriente eléctrica se debe al descubrimiento del telégrafo eléctrico fue uno de los primeros inventos que surgieron de los descubrimientos de Ampère y Faraday. El telégrafo, que empezó a usarse a partir de 1837, es un aparato que transmite mensajes codificados a larga distancia mediante impulsos eléctricos que circulan a través de un cable conductor.

Esta revisión histórica de dos inventos muy importantes nos permite obtener claridad para distinguir las señales analógicas de las señales digitales. El primer teléfono usó señales eléctricas de forma analógica, pero el telégrafo, años antes usó la corriente eléctrica de manera digital.

Se dice que un **sistema es analógico** cuando las magnitudes de la señal se representan mediante variables continuas, esto es *análogas* a las magnitudes que dan lugar a la generación de esta señal. Un **sistema analógico** contiene dispositivos que manipulan cantidades físicas representadas en forma analógica. En un sistema de este tipo, las cantidades varían sobre un intervalo continuo de valores.

Las señales digitales, en contraste con las señales analógicas, no varían en forma continua, sino que cambian en pasos o en incrementos discretos. La mayoría de las señales digitales utilizan códigos binarios o de dos estados. Las señales digitales toman uno de dos valores a través del tiempo. Su comportamiento se puede equiparar al de un interruptor. La ventaja de este tipo de transmisión es, primero, su inmunidad a las interferencias ya que al digitalizar una señal se elimina el ruido producido por el medio ambiente, produciendo una señal más pura y de mayor resolución y segundo, que puede codificarse utilizando el sistema binario.

Hasta hace poco, la forma dominante de transmisión de señales de radio y televisión ha sido analógica. La desventaja de este tipo de señal es que el ambiente genera también señales del tipo analógico, conocidas como ruido, que generalmente interfieren con las señales que son portadoras de información y crean complicaciones resultando una señal de menor calidad.

Con el paso del tiempo, las comunicaciones electrónicas han experimentado algunos cambios tecnológicos notables. Los sistemas tradicionales de comunicaciones electrónicas que utilizan técnicas de modulación analógica convencional, como son la modulación en amplitud (AM), la modulación en frecuencia (FM) y la

<sup>55</sup> Kuhlmann, Federico - Alonso, Antonio. Información y telecomunicaciones. La ciencia para todos. Fondo de Cultura Económica.

<sup>56</sup> Cosa que evoca o representa a otra.

modulación en fase (PM), están siendo reemplazadas, poco a poco, con sistemas de comunicaciones digitales. Estos sistemas de comunicación ofrecen varias ventajas sobresalientes, respecto a los sistemas analógicos tradicionales: facilidad de procesamiento, facilidad de multicanalización e inmunidad al ruido.

### 1.9 CARACTERIZACIÓN DE UNA SEÑAL DE CORRIENTE ALTERNA.

La necesidad de hacer mediciones del voltaje de una señal de corriente alterna (c.a.), surge por la necesidad de caracterizar de manera sencilla su comportamiento con respecto al tiempo.

Para empezar a conocer a la corriente alterna, que a diferencia de lo que sucede en corriente continua (c.c.), la c. a. invierte periódicamente su polaridad y su amplitud instantánea no es constante. Por consiguiente, cuando las formas de onda varían en el tiempo, no es suficiente medir el valor de la magnitud en un instante, sino que se hace necesaria la obtención de otros valores característicos muy útiles, como son el valor máximo o pico, y el valor eficaz o raíz cuadrática medio (rms).

La medición de señales de corriente alterna constituye un tema de suma importancia para la ciencia y la tecnología por muchas razones, entre las cuales podemos destacar que casi la totalidad de la energía eléctrica que se genera en el mundo para la industria y uso doméstico es de este tipo.

#### 1.9.1 Valor pico (o máximo) $V_m$ del voltaje de c.a.

Un generador de c.a. opera mediante la rotación de una bobina de alambre dentro de un campo magnético a velocidad angular constante,  $\omega$ . Se induce una fuerza electromotriz ( $fem$ ) que varía con el tiempo en forma sinusoidal:

$$v(t) = V_m \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (1)$$

Donde  $V_m$  es el voltaje máximo o valor pico (figura 1) y  $\omega = 2\pi f$  es la frecuencia angular, siendo  $f$  la frecuencia expresada en Hertz.

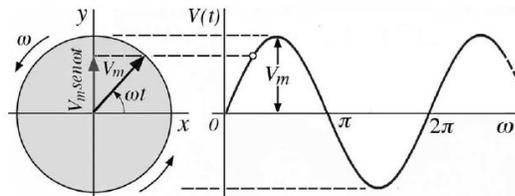


Fig. 7.1 Representación fasorial de un voltaje alterno

#### 1.9.2 Valor promedio (o c.d.) $V_{cd}$ del voltaje de una señal sinusoidal.

El valor promedio de una onda de corriente alterna que varía a lo largo de un periodo  $T$  es el valor representativo de todos los valores de cualquier onda periódica se obtiene dividiendo el área bajo la curva de la onda en un periodo  $T$ , entre el tiempo de este periodo. Esto se puede escribir como

$$V_{prom} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (4)$$

En este caso la curva es la senoide  $V(t) = V_m \cdot \text{sen}(\omega t)$  y el área bajo de ella se encuentra empleando la ecuación (4)

$$V_{prom} = \frac{1}{T} \int_0^T V_m \text{sen} \frac{2\pi t}{T} dt \equiv \frac{V_m}{T} \int_0^T \text{sen} \frac{2\pi t}{T} dt$$

$$V_{prom} = \frac{T V_m}{2\pi T} \left[ -\cos \frac{2\pi t}{T} \right]_0^T$$

$$V_{prom} = \frac{V_m}{2\pi} [(-1) - (-1)] \equiv 0$$

$$\boxed{V_{prom} = 0}$$

¡Este es un resultado importante que muestra que el valor promedio de una onda senoidal es cero!

### 1.9.3 Valor rms del voltaje de c.a.

Es necesario preguntarse: ¿qué es el valor eficaz o rms del voltaje de la corriente alterna? Se puede definir como el valor de c.a. que produce el mismo trabajo en cualquier elemento o dispositivo eléctrico (calor, por ejemplo, en una resistencia), equivalente al trabajo que produciría la aplicación de una corriente continua de igual valor en ese mismo elemento o dispositivo.

En otras palabras: El **valor rms** es el valor del voltaje en C.A. que produce el mismo efecto de disipación de calor que su equivalente de voltaje en corriente directa

Ejemplo:

1 voltio de corriente alterna (c.a.) rms produce el mismo efecto térmico que un voltio de corriente directa (c.d.) Por esta razón se utiliza el término “efectivo”.

Una forma de medir el *voltaje medio cuadrático* o *voltaje eficaz* (en inglés rms, “root mean square”) es por medio de un multímetro (VOM) en función c.a. (fig. 7.2)

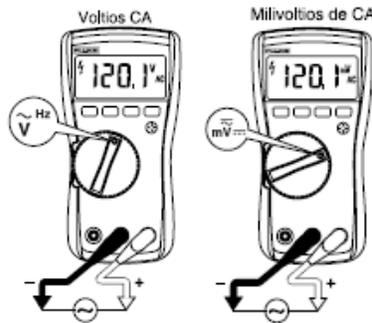


Figura 7.2. Uso de un multímetro Fluke 116 para medir el valor rms de c.a.

En general, el valor medio cuadrático o valor eficaz de una función periódica cuyo período es T, se define así:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [f(t)]^2 dt} \quad (2)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_m^2 \left[ \sin \frac{2\pi}{T} t \right]^2 dt}$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_m^2}{T} \int_0^T \left[ \frac{t}{2} - \frac{T \sin \left( \frac{4\pi}{T} t \right)}{4\pi} \right]_0^T dt}$$

$$\boxed{V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}}$$

Para el caso de una señal sinusoidal, de amplitud de voltaje máxima  $V_m$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \equiv 0.707 \cdot V_m \quad (3)$$

**Ejemplo:** Encontrar el **voltaje rms** de una señal con  $V_{PICO} = 130$  voltios

$$130 \text{ Voltios} \times 0.707 = 91.9 \text{ Voltios(rms)}$$

Si el circuito es alimentado por una fuente de voltaje alterno a la frecuencia de  $f$  (60 Hz es la frecuencia de la corriente alterna comercial), se dispondrá de un *multímetro* para la medida de los *valores eficaces* y de un *osciloscopio* que permite monitorear la señal en función del tiempo, permitiéndonos medir *voltajes pico* y voltajes instantáneos, así como determinar su periodo  $T$ , y su frecuencia  $f$ . En el desarrollo de la Unidad II del programa se estudiará con mayor detalle el funcionamiento de este instrumento.

#### 1.9.4 Valor promedio (o c.d.), $V_{cd}$ del voltaje de una onda senoidal rectificada.

##### 1.9.4.1 Rectificada de media onda

Se emplea un circuito **rectificador de media onda** para convertir una señal de corriente alterna a una forma de onda de **corriente directa pulsante** a la cual se le han eliminado los semiciclos negativos.

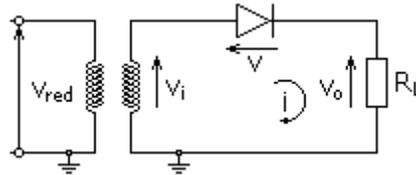


Figura 7.3 Circuito rectificador de media onda

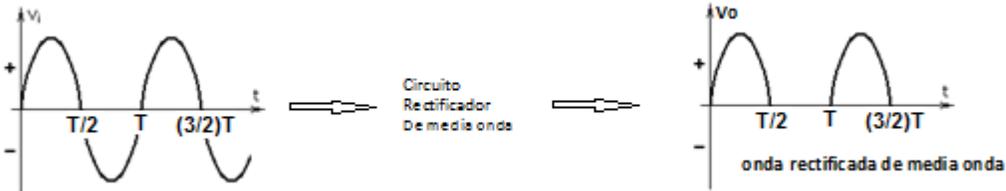


Figura 7.4 Formas de onda en un circuito rectificador de media onda

A diferencia de la señal de c.a., la onda rectificada de media onda si tiene un valor promedio diferente de cero, el cual se calcula usando la misma expresión matemática de la Ec.(2.6):

$$V_{prom} = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{T/2} V_m \sin \frac{2\pi t}{T} dt + \int_{T/2}^T 0 \cdot dt \right] \equiv \frac{V_m}{T} \int_0^{T/2} \sin \frac{2\pi t}{T} dt$$

$$V_{prom} = \frac{T V_m}{2\pi T} \left[ -\cos \frac{2\pi t}{T} \right]_0^{T/2}$$

$$V_{prom} = \frac{V_m}{2\pi} [(1) - (-1)] \equiv \frac{V_m}{2\pi} [2]$$

$$V_{prom} = \frac{V_m}{\pi}$$

##### 1.9.4.2 Rectificador de onda completa con dos diodos.

Un *Rectificador de onda completa* es un circuito empleado para convertir una señal de entrada senoidal de corriente alterna ( $V_i$ ) en una salida de corriente continua pulsante ( $V_o$ ). A diferencia del rectificador de media onda, en este caso, la parte negativa de la señal se convierte en positiva.

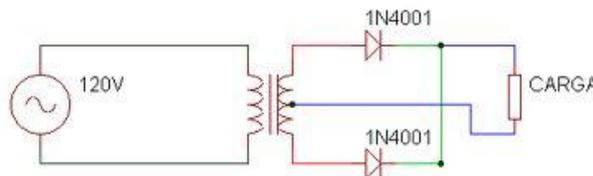


Figura 7.5 Circuito rectificador de onda completa

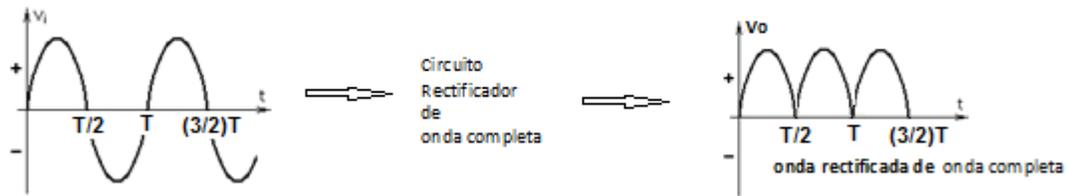


Figura 7.6 Formas de onda en un circuito rectificador de onda completa

El cálculo del valor promedio de la señal rectificada de onda completa se obtiene siguiendo el procedimiento indicado a continuación, empleando como apoyo lo mostrado en la forma de onda lograda para un circuito de este tipo:

$$V_{\text{prom}} = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{T/2} V_m \sin \frac{2\pi t}{T} dt + \int_{T/2}^T V_m \sin \frac{2\pi t}{T} dt \right] \equiv \frac{V_m}{T} \left[ \int_0^{T/2} \sin \frac{2\pi t}{T} dt + \int_{T/2}^T \sin \frac{2\pi t}{T} dt \right]$$

$$V_{\text{prom}} = \frac{V_m}{T} \left\{ \left[ \frac{T}{2\pi} \left[ -\cos \frac{2\pi t}{T} \right]_0^{T/2} \right] + \left[ \frac{T}{2\pi} \left[ -\cos \frac{2\pi t}{T} \right]_{T/2}^T \right] \right\}$$

$$V_{\text{prom}} = \frac{V_m \cdot T}{T \cdot 2\pi} \left\{ \left[ -\cos \frac{2\pi t}{T} \right]_0^{T/2} + \left[ -\cos \frac{2\pi t}{T} \right]_{T/2}^T \right\}$$

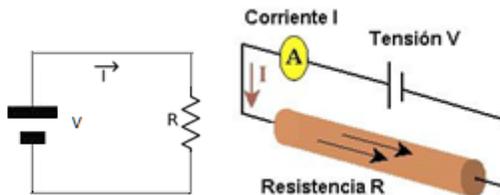
$$V_{\text{prom}} = \frac{V_m}{2\pi} \cdot [(1) - (-1)] + [(1) - (-1)]$$

$$V_{\text{prom}} = \frac{V_m}{2\pi} \cdot [2 + 2]$$

$$V_{\text{prom}} = \frac{2 \cdot V_m}{\pi}$$

### 1.10 LEY DE OHM.

Georg Simon Ohm, físico experimental, nació en Erlangen (Alemania) el 16 de marzo de 1789. Enunció una ley fundamental de la electricidad que establece la relación entre las tres cantidades eléctricas en un circuito simple: la intensidad de corriente, la diferencia de potencial y la resistencia. Su propuesta constituye actualmente la denominada ley de Ohm, por ello la unidad de resistencia eléctrica se denomina ohm (su símbolo,  $\Omega$ ) en su honor.



Sus experimentos con circuitos le permitieron afirmar que la intensidad de la corriente  $I$  que circula por un conductor es directamente proporcional a la diferencia de potencial  $V$  aplicada entre los extremos del citado conductor:

$$I \propto V$$

Ohm completó las observaciones introduciendo la noción de resistencia eléctrica  $R$ , al colocar en el lugar de  $R$  diferentes materiales que aumentan o disminuyen la intensidad eléctrica, sin variar el valor de la diferencia de potencial  $V$ ; los materiales que disminuían la intensidad de la corriente les atribuyó la propiedad de poseer mayor resistencia eléctrica; en otros, la corriente se incrementaba, considerándolos con menor resistencia, lo cual expresó por medio de la proporcionalidad

$$I \propto \frac{1}{R}$$

Considerando ambas proporcionalidades

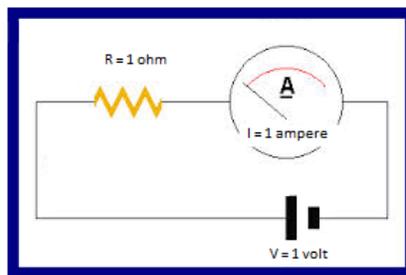
$$I \propto \frac{V}{R}$$

La proporcionalidad se convierte en proporcionalidad si introducimos una constante de proporcionalidad

$$I = k \frac{V}{R}$$

En el sistema internacional de unidades (SI), la unidad de la diferencia de potencial es el voltio y la unidad de intensidad de corriente es el amperio, haciendo  $k = 1$ , se tiene la siguiente definición para la unidad de resistencia:

Determinación de la unidad de resistencia eléctrica: Un circuito tiene una resistencia de 1 ohm, cuando al aplicarle una diferencia de potencial de 1 volt, circula una corriente de 1 amperio.



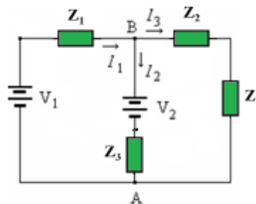
**Definición de la unidad de resistencia eléctrica**

El símbolo de la resistencia es:



### 1.11 CIRCUITOS ELÉCTRICOS.

Un circuito eléctrico es una interconexión de dos o más componentes, tales como resistencias, inductores, condensadores, fuentes, interruptores y semiconductores, que contiene al menos una trayectoria cerrada. Los circuitos que contienen solo fuentes, componentes lineales (resistores, condensadores, inductores) pueden analizarse por métodos algebraicos para determinar su comportamiento en corriente directa o en corriente alterna.



**Figura 1**

**Componentes de un circuito:** Se les llama componentes de un circuito a cualquier dispositivo eléctrico con dos o más terminales en el que puede fluir interiormente una corriente eléctrica. En la figura 1 se ven seis componentes entre impedancias y fuentes.

Se usan con frecuencia los siguientes símbolos para representar los componentes del circuito.



Para analizar los circuitos es necesario comprender ciertos conceptos:

**Nodo:** Un nodo es un punto de un circuito donde se conectan a lo menos tres elementos:

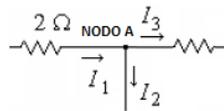


Figura 2

**Rama:** Es una conexión de elementos eléctricos en serie entre dos nodos. El circuito de la figura 1, tiene dos nodos, A y B. Entre estos dos nodos se tiene tres ramas. Una de ellas es

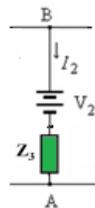


Figura 3

**Circuito cerrado, malla o lazo** ("loop", en inglés). Es una trayectoria (o recorrido) en un circuito formada por una conexión en serie de varios elementos que se inicia y termina en el mismo nodo.

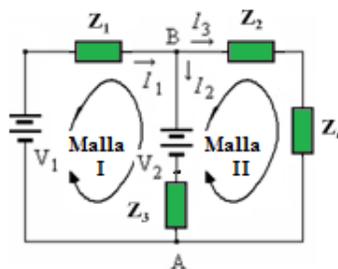
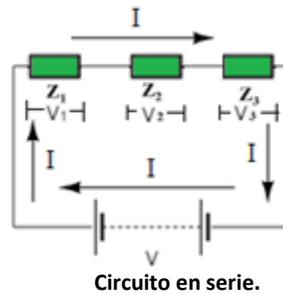


Figura 4

### 1.11.1 Circuito eléctrico en serie.

Está formado por diferentes componentes montados de tal forma que la salida de un componente está conectada a la entrada de otro, y así sucesivamente para todos los componentes.

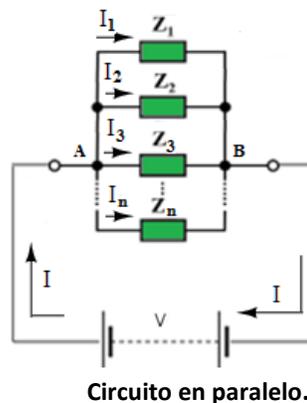


Sus características más importantes son:

- La **intensidad de la corriente** que circula por un componente es **del mismo valor** que la de los otros, ya que no hay ninguna derivación hacia otra parte del circuito.
- La diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito en serie es igual a la suma de las diferencias de potencial en cada elemento.

### 1.11.2 Circuito eléctrico en paralelo.

Este tipo de conexión se implementa con diferentes componentes montados de tal forma que la entrada de cada componente está conectada a un mismo punto del circuito y cada salida de los mismos está conectada a otro punto común del circuito.



Sus características más importantes son:

- Todos los elementos entre los nodos A y B tienen la misma diferencia de potencial.
- La **suma** de todas las **intensidades de corriente** que circula por cada componente conectada al nodo A, es **del mismo valor** que la corriente total que proporciona la batería al mismo nodo.

### 1.11.3 Resistencia equivalente de un circuito en serie.

Es conveniente establecer el significado del concepto de resistencia equivalente: Cuando entre dos puntos de un circuito hay varias resistencias conectadas formando asociaciones en serie o paralelo, éstas pueden ser sustituidas por una sola que al ser conectada entre esos mismos puntos hay la misma corriente como si estuvieran todas. El primer caso que se puede estudiar es la determinación de la resistencia equivalente de un circuito serie:

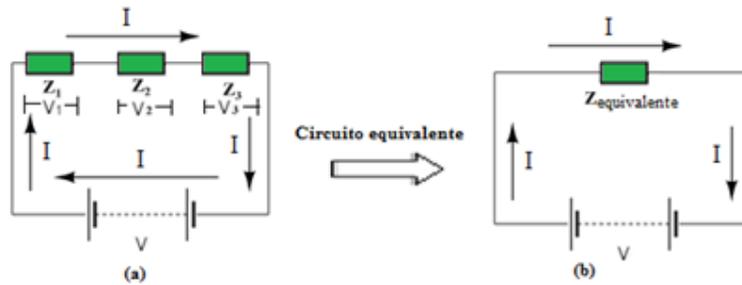


Figura 5

En el circuito (a) de la figura 5

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \text{ -----De acuerdo al principio b) de los circuitos en serie, tenemos}$$

Al aplicar la ley de Ohm en cada elemento y factorizar:

$$V = I * Z_1 + I * Z_2 + I * Z_3 = I * (Z_1 + Z_2 + Z_3) \text{ ----- (A)}$$

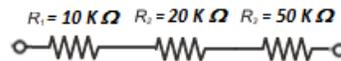
Ahora, en el circuito (b) de la figura 2

$$V = I * Z_{eq} \text{ ----- (B) Por ley de Ohm}$$

Relacionando termino a término a las ecuaciones (A) y (B), resulta que

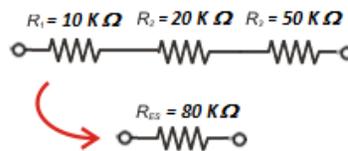
$$Z_{eq} = Z_1 + Z_2 + Z_3$$

**Ejemplo:** Encontrar la resistencia equivalente de las siguientes resistencias en serie:



Solución:

$$R_{eq} = 10\text{K}\Omega + 20\text{K}\Omega + 50\text{K}\Omega = 80\text{K}\Omega$$



#### 1.11.4 Resistencia equivalente de un circuito en paralelo.

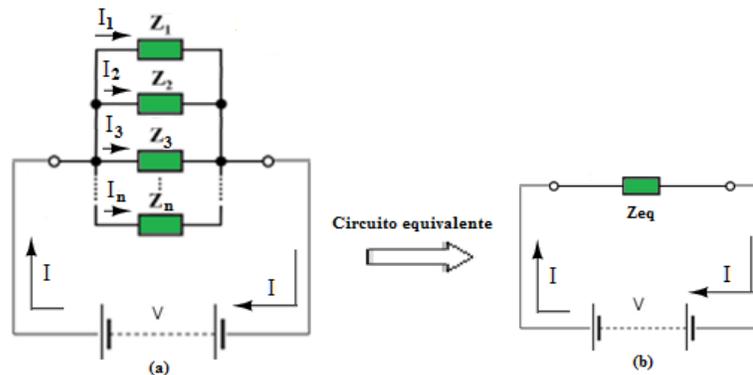


Figura 6

En el circuito (a) de la figura 6

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \text{ -----De acuerdo al principio b) de los circuitos en paralelo.}$$

$$I = \frac{V_1}{Z_1} + \frac{V_2}{Z_2} + \frac{V_3}{Z_3} + \dots + \frac{V_n}{Z_n} = \frac{V}{Z_1} + \frac{V}{Z_2} + \frac{V}{Z_3} + \dots + \frac{V}{Z_n} \text{ -----Aplicación de la ley de Ohm y aplicación de la característica a) de los circuitos en paralelo.}$$

$$I = V \left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \dots + \frac{1}{Z_n} \right) \text{ ----- Al factorizar términos}$$

Por otro lado, en el circuito (b) de la figura 3:

$$I = \frac{V}{Z_{eq}} = V \left( \frac{1}{Z_{eq}} \right) \text{ ----- (B) Por ley de Ohm.}$$

Relacionando las ecuaciones (A) y (B) término a término resulta que

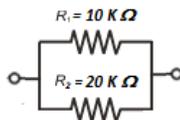
$$\frac{1}{Z_{eq}} = \left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \dots + \frac{1}{Z_n} \right)$$

Esta expresión indica que el inverso de la  $Z_{eq}$  es igual que la suma algebraica de los inversos de cada  $Z_n$ . Así, si se tienen dos resistencias en paralelo

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) = \left( \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 \cdot Z_2} \right), \text{ por lo que}$$

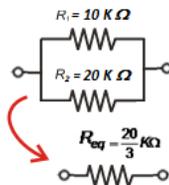
$$Z_{eq} = \left( \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)$$

**Ejemplo:** Encontrar la resistencia equivalente de las siguientes resistencias en paralelo.



Solución:

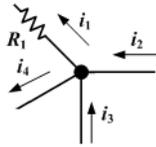
$$R_{eq} = \left( \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right) = \frac{10K\Omega \cdot 20K\Omega}{10K\Omega + 20K\Omega} = \frac{200K^2\Omega^2}{30K\Omega} = \frac{20}{3} K\Omega$$



### 1.11.5 Las dos leyes de los circuitos eléctricos de Kirchoff.

La generalización de los principios de los circuitos en serie y paralelo recién vistos, más la consideración de los principios de conservación de la carga y de la energía, llevaron a **Kirchoff** a plantear dos leyes que llevan su nombre:

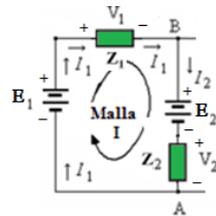
- **Primera Ley de Kirchoff**, también llamada **ley de los nodos** (o ley de las corrientes): La suma de corrientes que entran a un nodo es igual a la suma de las que salen (Todas las corrientes entrantes y salientes en un nodo suman 0). Para un metal, en el que los portadores de carga son los electrones, la anterior afirmación equivale a decir que los electrones que entran a un nodo en un instante dado son numéricamente iguales a los que salen. Los nodos no acumulan carga (electrones).



La ley se representa simbólicamente como

$$\sum_{n=1}^{\infty} I_n = 0$$

- **Segunda Ley de Kirchoff**, también llamada **ley de voltajes o mallas**: La suma algebraica de las diferencias de potencial alrededor de un circuito cerrado o malla es igual a cero volts.



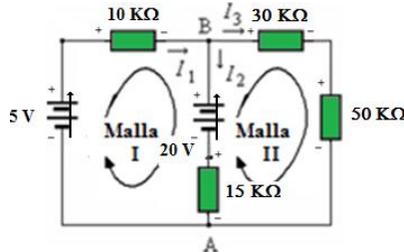
La ley de voltajes se representa simbólicamente como

$$\sum_{n=1}^{\infty} V_n = 0$$

Debe tomarse en cuenta lo siguiente:

- La dirección de la trayectoria de la malla indica el sentido en que hay que recorrer el circuito.
- La dirección de la fem de una batería (o un generador) es de (-) a (+) internamente.
- La corriente impulsada por la fem de una batería circula en el circuito del polo (+) al (-), que es el sentido convencional de la corriente.
- La dirección de la corriente eléctrica de la rama (que no debe confundirse con el sentido de la malla).

**Ejemplo.** Utilizando las leyes de Kirchoff, hallar el valor de las corrientes  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ .



Ecuación para la malla I

$$\begin{aligned} 5 - J_1(10K + 15K) - 20 + J_2(15K) &= 0 \\ -J_1(25K) + J_2(15K) &= 15 \end{aligned}$$

Ecuación para la malla II

$$-J_2(15K + 30K + 50K) + 20' + J_1(15K) = 0$$
$$-J_2(95K) + J_1(15K) = -20$$

Ecuaciones para las corrientes

$$I_1 = J_1$$
$$I_2 = J_1 - J_2$$
$$I_3 = J_2$$

Solución con el software Mathcad

Given

$$J_1 := 0 \quad J_2 := 0$$

$$-J_1 \cdot 25 + J_2 \cdot 15 = 15$$

$$-J_2 \cdot 95 + J_1 \cdot 15 = -20$$

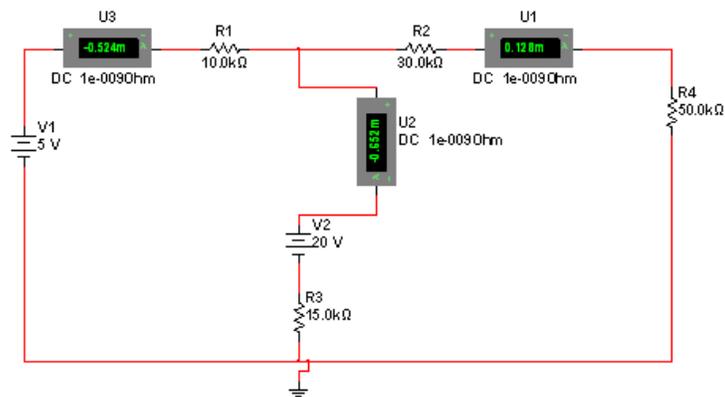
$$\text{Find}(J_1, J_2) = \begin{pmatrix} -0.523 \\ 0.128 \end{pmatrix}$$

$$I_1 = -0.523 \text{ mA}$$

$$I_2 = (-0.523) - (0.128) = -0.651 \text{ mA}$$

$$I_3 = 0.128 \text{ mA}$$

Simulación con el software Multisim:



## 1.12 NORMAS DE SEGURIDAD EN LA MEDICIÓN DE VARIABLES ELÉCTRICAS.

Se supone que medir los parámetros eléctricos puede ser relativamente sencillo. Más fácil si se dispone de instrumentos de medición digitales con los últimos avances tecnológicos. Este contexto lleva a considerar las mediciones eléctricas una actividad simple y mecanizada, que se centra en el dominio del instrumento de medición. La realidad es otra, porque medir en electricidad depende de otras condiciones, que deben ser tomadas en cuenta todas ellas si quiere correr el riesgo de llevar a cabo una correcta medición. Así, para el éxito al medir es importante poseer los siguientes aspectos teóricos e instrumentales:

- Conocimiento y comprensión de los conceptos de las variables físicas a medir.
- Estar familiarizado con los diferentes métodos de medición.
- Conocimiento de las características y la operación de los distintos equipos de medición que se utilicen.
- Establecer las mejores condiciones para trabajar con electricidad y la observancia de las normas de seguridad.

Este último punto, es un asunto importantísimo que muchas veces se pasa por alto: No reconocer los riesgos eléctricos. El indebido empleo y medición de la electricidad puede ser peligroso e incluso fatal para los que no tienen cuidado y no toman en cuenta algunas reglas simples de seguridad.

El uso común de la electricidad como fuente de energía, ha provocado no se tomen en cuenta los peligros que puede acarrear, por lo que generalmente no se toman las precauciones debidas. Como consecuencia, el promedio de percances de trabajadores por día mientras realiza sus tareas con electricidad, es alto. Según dato de la empresa Fluke, fabricante de equipos de medida electrónicos, se tiene una media de 9000 trabajadores de Estados Unidos al día que sufre accidentes laborales, dejándolos inválidos.

Cuando se trabaja en el laboratorio eléctrico o cuando se utiliza equipo eléctrico en cualquier otro sitio, observar debidamente precauciones de seguridad es tan importante como hacer mediciones exactas. Existe un riesgo potencial en el ambiente del laboratorio eléctrico y una falla al seguir los procedimientos de seguridad puede hacer a usted o a su compañero de trabajo víctima de un serio accidente. La mejor forma de evitar accidentes es eliminar sus causas y seguir cuidadosamente procedimientos de seguridad previamente establecidos. Una plena conciencia de los peligros y las posibles consecuencias de los accidentes ayuda a desarrollar un hábito y una automotivación para seguir tales procedimientos.

Insistiendo, la seguridad es una parte muy importante de cualquier trabajo. Por ello, aquí se exponen algunas recomendaciones (no se pueden abarcar todas), que le ayudarán a darse cuenta (y evitar) algunos de los riesgos o peligros de trabajar con los aparatos eléctricos en el laboratorio o en otro sitio, en particular los de la descarga eléctrica. Con estas sugerencias, no se tiene la intención de hacer recomendaciones que desarrollen miedo a la electricidad, sino la prudencia necesaria para su manejo respetuoso. Comience bien su carrera, haga las cosas correctamente desde el principio, aprenda y use prácticas seguras, cultive buenos hábitos de seguridad. Finalmente, se dice: la seguridad es responsabilidad de todo el mundo, pero en última instancia está en manos de cada quien.

### 1.12.1 Descarga eléctrica:<sup>57</sup>

El riesgo más común y serio en el laboratorio eléctrico es el choque o descarga eléctrica. Cuando la corriente eléctrica pasa a través del cuerpo humano produce el efecto llamado choque o descarga eléctrica. El choque eléctrico puede ocurrir debido a un deficiente diseño del equipo, fallas eléctricas, errores humanos, o una combinación de infortunadas circunstancias.

El aspecto letal del choque eléctrico es función de la cantidad de corriente la cual es forzada a pasar a través del cuerpo humano, como camino de conducción. No necesariamente depende del valor del voltaje aplicado. Un choque de 100 V puede resultar tan mortal como un choque de 1.000 V.

---

<sup>57</sup> Del inglés, electrical shock. Popularmente también se traduce como “toque eléctrico”.

La severidad de un choque eléctrico varía de acuerdo, con la edad, sexo, y condiciones físicas de la víctima. Pero en general, el nivel de corriente requerido para matar cualquier ser humano es marcadamente pequeño. Por esta razón, siempre deben ejercerse cuidados extremos para prevenir que ocurra el choque eléctrico.

El nivel de voltaje requerido para que una corriente fatal fluya por el cuerpo humano depende de la resistencia de la piel en el punto de contacto. La piel húmeda puede tener una resistencia tan baja como 1 kΩ, mientras que la piel seca una resistencia tan alta como 500 kΩ. (Una vez que la corriente pasa adentro del cuerpo encuentra una resistencia mucho menor debido a la conductividad de los fluidos del cuerpo). Por tanto, un potencial de 100 V aplicado a una piel húmeda puede ser fatal. En efecto 50 V aplicados bajo condiciones especiales pueden ser tan fatales como 5000 V. Más aún, la resistencia de la piel baja rápidamente a medida que la corriente pasa a través del punto de contacto, porque la corriente rompe las capas secas y externas de la piel.

Por esta razón es importante romper el contacto con el conductor vivo tan pronto como sea posible. Puesto que el voltaje en el punto de contacto permanece constante, mientras que la resistencia decrece, la corriente puede subir rápidamente hasta un nivel letal.

La **tabla 1** indica lo que sucede al cuerpo humano con rangos de corriente comunes de uso casero (con duración de contacto de un segundo). Cuanto mayor sea la duración de la exposición, mayor será el peligro para la víctima de la descarga eléctrica. Por ejemplo, una corriente de 100 mA por 3 segundos es tan peligrosa como una corriente de 900 mA por una fracción de segundo (0.03 segundos). También influye la estructura muscular de la persona. Las personas con menos tejido muscular normalmente se ven afectadas a niveles más bajos de corriente eléctrica.

Efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano <sup>3,4</sup>	
Reacción por la corriente	
Menos de 1 miliamperio	Normalmente es imperceptible.
1 miliamperio	Cosquilleo leve.
5 miliamperios	Se siente una leve descarga; indolora pero molesta. Las personas comunes pueden soltar. Reacciones involuntarias fuertes pueden ocasionar otras lesiones.
6–25 miliamperios (mujeres)	Descarga dolorosa, pérdida del control muscular. Corriente que congela o el rango de "posibilidad de soltar". La persona no puede soltar el objeto, pero puede ser arrojada del circuito si se estimulan los músculos extensores.*
9–30 miliamperios (hombres)	
50–150 miliamperios	Dolor intenso, paro respiratorio (se detiene la respiración), fuertes contracciones musculares. La muerte es posible.
1,000–4,300 miliamperios	Se interrumpe el bombeo rítmico del corazón. Ocurre contracción muscular y daños nerviosos; muerte probable.
10.000 miliamperios	Ocurre paro cardíaco y quemaduras graves. Muerte altamente probable.
15.000 miliamperios	Sobrecorriente mínima debido a la cual un fusible o disyuntor típico abre un circuito.

\*Si los músculos extensores se estimulan debido a la descarga, puede ser que la persona sea arrojada de la fuente de energía. La sobrecorriente mínima debido a la cual un fusible o disyuntor típico abre el circuito es de 15,000 miliamperios (15 amps).

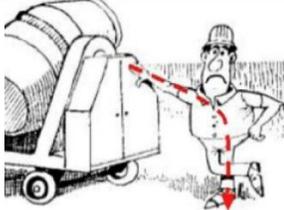
**Tabla 1. Efectos de varios niveles de corriente en el cuerpo humano.**

### 1.12.2 Riesgos por al manejar de la electricidad

			
Riesgo	Causas	Consecuencias	
Cortocircuito y Sobrecarga	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unión directa de dos conductores con diferente potencial.</li> <li>• Conexiones flojas o cargas trabajando por encima de su corriente nominal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incendios.</li> <li>• Daño de los cables.</li> <li>• Destrucción de los receptores de energía</li> </ul>	
Corrientes de Fuga	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deterioro de los aislantes de partes conductoras.</li> <li>• Corrientes superficiales (humedad, polvo).</li> <li>• Contactos directos o indirectos accidentales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electrocuación de las personas</li> <li>• Incendios.</li> <li>• Destrucción de los receptores</li> </ul>	
Arco eléctrico	Impurezas y Polvo Corrosión Sobre-Voltajes a través de espacios estrechos: Falla de los materiales aislantes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperaturas extremadamente altas</li> <li>• Explosiones sonoras</li> <li>• Ondas de presión.</li> </ul>	

**Tabla 2. Algunos riesgos de la electricidad**

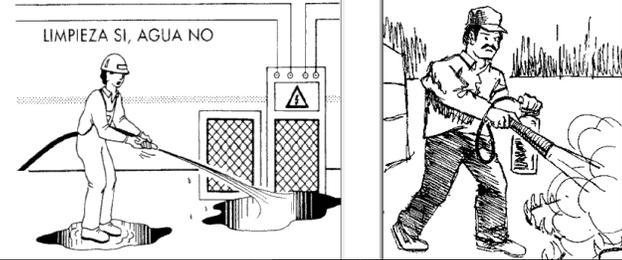
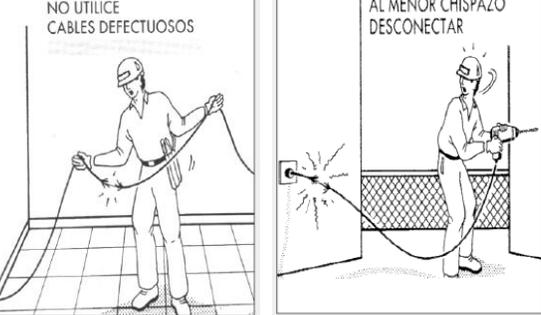
### 1.12.3 Accidentes eléctricos. Forma de producirse

			
Accidente	Causas	Porcentaje de ocurrencia	
Contacto directo	Cuando entramos en contacto con algún elemento que accidentalmente está en tensión.	34.5	
Contacto indirecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contacto con algún elemento que accidentalmente está conectado a una línea viva.</li> <li>• Aislamiento de protección defectuoso.</li> <li>• No dispone de conexión para toma de tierra.</li> </ul>	17.5	
Electrocuación	Impurezas y Polvo Corrosión Sobre-Voltajes a través de espacios estrechos: Falla de los materiales aislantes.	48.0	

**Tabla 5. Accidente eléctrico. Forma de producirse.**

### 1.12.4 Consejos básicos para usar con mayor seguridad a la electricidad.

En la tabla siguiente se indican algunos consejos fundamentales para asegurar el uso de la electricidad con mayor seguridad.

Referencia	Indicación	Imagen
1	Capacitación  No realice trabajos eléctricos si no has sido capacitado	
2	La línea de alimentación y las reparaciones  No realizar reparaciones sin cortar la línea de alimentación.	
3	La electricidad y el agua  NO utilizar aparatos eléctricos con las manos mojadas o los pies en el agua	
4	La electricidad y el agua se llevan como el perro y el gato: mantenerlos siempre separados  Limpieza sin agua.	
5	Cables defectuosos  No usar cables defectuosos	

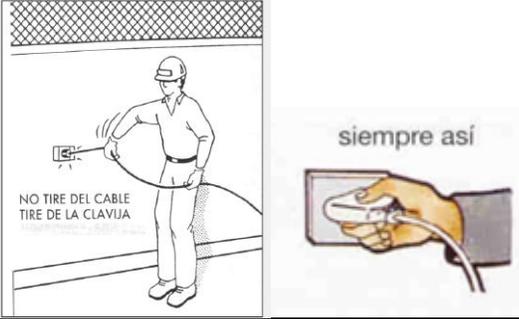
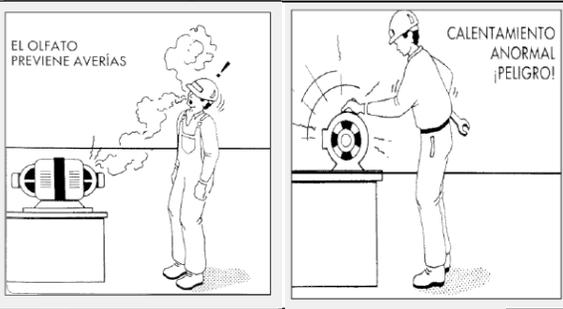
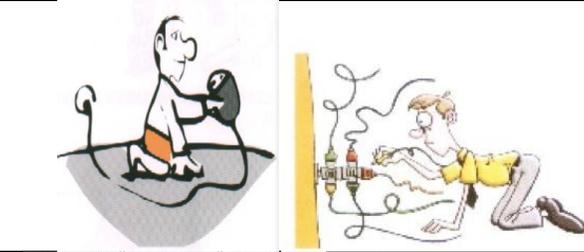
6	Desconexión de un cable del contacto.	Para desconectar un cable de un contacto, jálalo de la clavija.	
7	Clavijas para hacer conexión a un contacto	No conectar los cables a un contacto sin su clavija	
8	Síntomas de una falla	Detenga el funcionamiento de máquinas u otros aparatos si siente olores que indiquen que algo se está quemando.	
9	No use equipo o elementos eléctricos defectuosos	Informe a mantenimiento de cualquier equipo defectuoso	
10	Extensiones	No haga uso excesivo de extensiones eléctricas.	
11	Condiciones ambientales	Tener suficiente iluminación y no trabajar solo.	

Tabla 6. Consejos básicos

### 1.12.5 Seleccione el instrumento de medida adecuado:

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) desarrolla normas internacionales de carácter general para la seguridad en la medida. Así, la norma IEC61010-1 especifica categorías basadas en la distancia a la que se encuentra el equipo de la fuente de electricidad (Tabla 7 y figura 1) y en la disipación natural de la energía transitoria que se produce en un sistema de distribución eléctrica. Las categorías más altas son las más cercanas a la fuente de electricidad y requieren mayor protección frente a transitorios del instrumento.

Categoría de sobretensión	En resumen	Ejemplos
CAT IV	Conexión trifásica en dispositivo, cualquier conductor exterior	<ul style="list-style-type: none"> <li>Indica el "origen de la instalación", es decir, donde se realiza la conexión de baja tensión (acometida) a la alimentación de alta tensión.</li> <li>Contadores de electricidad y equipos de protección principales contra sobrecorrientes.</li> <li>Entrada exterior y de servicio, cable de acometida desde el origen de alta tensión al edificio, tramo entre el contador y el cuadro.</li> <li>Línea aérea hasta edificios no adosados, línea subterránea a la bomba del pozo.</li> </ul>
CAT III	Distribución trifásica, incluida la iluminación comercial monofásica	<ul style="list-style-type: none"> <li>Equipo en instalaciones fijas, como conmutadores de alta tensión y motores polifásicos.</li> <li>Alimentadores y colectores de plantas industriales.</li> <li>Alimentadores y ramales cortos, dispositivos de cuadros de distribución.</li> <li>Sistemas de iluminación en grandes edificios.</li> <li>Tomas de corriente de dispositivos eléctricos con conexiones cortas a entradas de servicio.</li> </ul>
CAT II	Cargas monofásicas de recepción conectadas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dispositivos eléctricos, instrumentos portátiles y otras cargas domésticas similares.</li> <li>Tomas de corriente y ramales largos.</li> <li>Tomas de corriente a más de 10 metros de una fuente CAT III.</li> <li>Tomas de corriente a más de 20 metros de una fuente CAT IV.</li> </ul>
CAT I	Electrónica	<ul style="list-style-type: none"> <li>Equipo electrónico protegido.</li> <li>Equipo conectado a circuitos (de fuente) en los que se han tomado medidas para reducir las sobretensiones de los transitorios a un nivel bajo apropiado.</li> <li>Cualquier fuente de alta tensión y baja potencia derivada de un transformador de alta resistencia de devanado, como la sección de alta tensión de una fotocopiadora.</li> </ul>

Tabla 7. Descripción de los diferentes CAT.

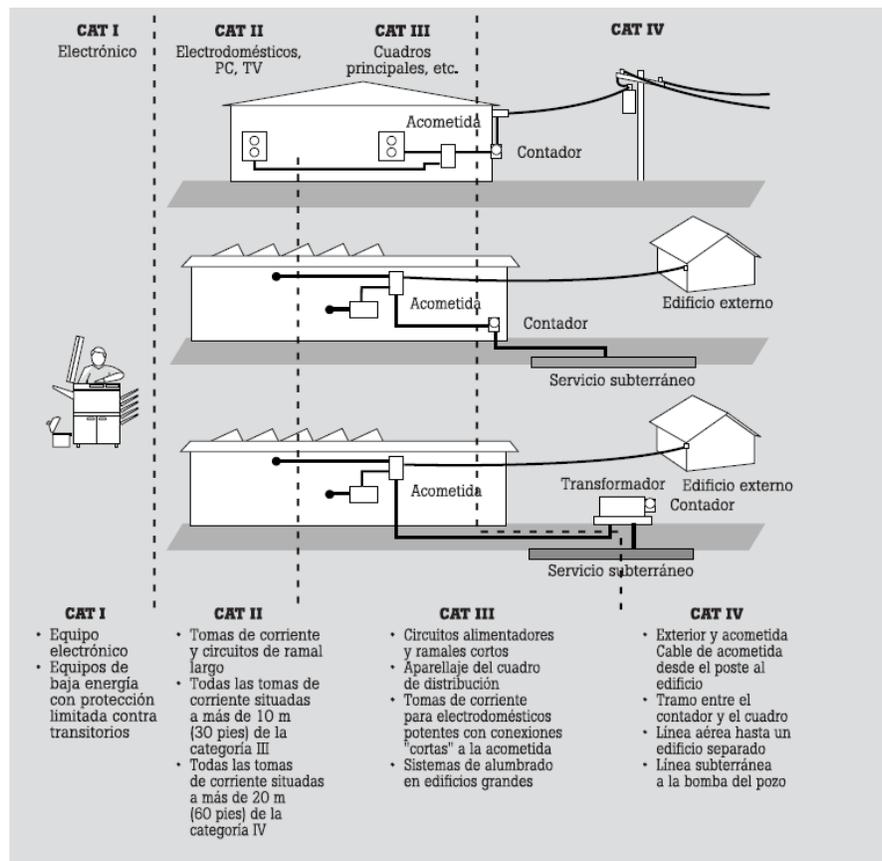
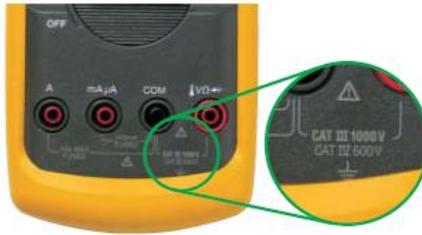


Figura 1. Descripción de los diferentes CAT.

- Elija el instrumento de medida que tenga la máxima categoría y tensión que pueda utilizar (en la mayoría de los casos, 600 o 1000 voltios CAT III y/ó 600 voltios CAT IV).
- Busque las marcas de categoría y tensión junto a los conectores de entrada del instrumento de medida y el símbolo de doble aislamiento en la parte posterior.



*Utilice multímetros con las siguientes marcas:  
1000 V CAT III ó 600 V CAT IV*

**Figura 2. Localización del CAT en los multímetros.**

### 1.12.6 Errores que suelen cometerse al usar instrumentos de medición de variables eléctricas

1. Sustituir el fusible original por otro más barato. Al cambiar el fusible del multímetro, asegúrese de hacerlo con un fusible del mismo tipo.
2. Utilizar un trozo de alambre o metal para sustituir los fusibles. Puede parecer una reparación rápida cuando no se tienen fusibles disponibles, pero ese fusible puede ser lo que acabe en una descarga entre usted y el circuito.
3. Utilizar el instrumento de medida incorrecto. Es importante que el DMM sea el apropiado para su trabajo. Asegúrese de que el instrumento de medida dispone de la categoría de seguridad “CAT” correcta para cada trabajo que vaya a realizar.
4. Trabajar en un circuito con tensión. Desconecte el circuito siempre que sea posible. Si la situación requiere trabajar con tensión, utilice instrumentos convenientemente aislados correctamente, utilice guantes de seguridad, quítese el reloj o cualquier otro tipo de ornamento, colóquese sobre una manta aislante.
5. Colocar ambas manos en la medida. Al trabajar con circuitos con tensión, recuerde el viejo truco del electricista: mantenga una mano en el bolsillo. De este modo se reducen las probabilidades de que se produzca un circuito cerrado a través del pecho y del corazón.

### 1.12.7 Los reglamentos de seguridad en los laboratorios de medidas eléctricas y electrónicas.<sup>58</sup>

Antes de hacer uso de instrumentos y equipos que generen riesgos, el estudiante deberá ser capacitado y autorizado para su uso. Antes de efectuar cualquier medición, es necesario estudiar los manuales de uso de los equipos eléctricos y electrónicos de medición, para asegurarse que las fuentes de poder de tales circuitos y equipos deban operarse en el modo y la secuencia requerida. Hay que considerar que los equipos tienen una fuente de alimentación, y un límite superior de voltaje, sea para la entrada de alimentación como para la de medición.

Lo anterior es una de las razones que obligan a todos los laboratorios de las instituciones educativas elaboran sus propios reglamentos. Son disposiciones que regulan el ingreso, uso y permanencia de los docentes y alumnos en el laboratorio de la asignatura. De manera general manejan los siguientes aspectos:

Para el alumno:

- Acceso al laboratorio respetando los horarios y tolerancias establecidos.
- Uso de ropa y accesorios personales.
- Presentar la planeación de la práctica correspondiente.

<sup>58</sup>[https://www.cenidet.edu.mx/subaca/webelec/docs/REGLAMENTO%20DE%20SEGURIDAD%20DIE%202008\\_Version 6.pdf](https://www.cenidet.edu.mx/subaca/webelec/docs/REGLAMENTO%20DE%20SEGURIDAD%20DIE%202008_Version%206.pdf)

- No efectuar experimentos sin la preparación o que no se incluyen dentro de su práctica ya que ponen en riesgo su seguridad y la de sus compañeros o las instalaciones
- Cuidar limpieza del área de trabajo y de las instalaciones y equipos.
- Evitar dejar energizados y desatendidos equipos como osciloscopios, fuentes de poder, multímetros, cautines, etc.
- Del derecho a disponer del material y/o equipo.
- No consumir alimentos, bebidas de cualquier tipo o fumar.
- Formas de identificación para solicitar material, equipo y herramienta.
- Sobre cualquier defecto observado en el equipo y/o material de laboratorio
- Mantener orden (no jugar, no correr y acatar las medidas de seguridad indicadas)
- No abrir y/o reparar material, equipo y herramientas del laboratorio.

Para el docente:

- Informar al alumno de las medidas de seguridad.
- Asesorar previamente al alumno en la práctica a realizar.
- Supervisar la ejecución de las prácticas
- Supervisar a los alumnos a fin de que usen adecuadamente las instalaciones, el material, equipo y herramental del laboratorio.
- Se responsabiliza con relación a la organización y conducta de los alumnos.

## CONTENIDO DE LA UNIDAD I

UNIDAD 1.....	1
Conceptos Básicos .....	1
1.1 CONCEPTO DE MEDIDA.....	1
1.1.1 Contar. Sus orígenes.....	1
1.1.2 Concepto de número.....	2
1.1.3 Medir y medida.....	2
1.1.4 Incertidumbre en una medición.....	3
1.1.5 Calibración.....	3
1.1.6 La trazabilidad.....	4
1.1.7 Repetibilidad de los resultados.....	5
1.2 METROLOGIA.....	5
1.3 NORMAS OFICIALES EN MÉXICO.....	6
1.4 ELEMENTOS DE LA MEDICION.....	7
1.4.1 Magnitudes físicas.....	7
1.4.1.1 Tipos de magnitudes físicas:.....	8
1.4.1.1.1 Por su origen: .....	8
1.4.1.1.2 Por su naturaleza matemática, las magnitudes se clasifican en escalares y vectoriales:.....	9
1.4.1.1.3 Según su actividad, se clasifican en magnitudes extensivas e intensivas: .....	9
1.4.1.2 Relación entre magnitudes intensivas y extensivas.....	10
1.4.2 Características de los instrumentos de medición.....	11
1.4.2.1 Exactitud, error y precisión.....	11
1.4.2.2 Fuentes de error.....	12
1.4.2.3 Rango.....	13
1.4.2.4 Alcance (span).....	13
1.4.2.5 Fiabilidad.....	14
1.4.2.6 Linealidad.....	14
1.4.2.7 Sensibilidad.....	15
1.4.2.8 Resolución.....	15
1.4.3 Los métodos de medida.....	15
1.5 SISTEMAS DE UNIDADES Y PATRONES.....	18
1.5.1 Orígenes del sistema métrico actual.....	18
1.5.1.1 Gabriel Mouton (1670).....	18
1.5.1.2 La determinación de milla náutica.....	19
1.5.1.3 El Sistema Métrico Decimal francés. (1799).....	19
1.5.1.4 Unidad de peso.....	22
1.5.1.5 El Sistema Internacional de unidades (SI).....	23
1.5.1.6 La Convención del Metro, 1875.....	23

1.5.1.7 Reuniones de la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) y sus decisiones más importantes...	25
1.5.2. Las unidades básicas.....	28
1.5.3 Definiciones de las unidades básicas.....	28
1.5.4 Unidades derivadas expresadas en función de unidades básicas. ....	30
1.5.5 Los múltiplos y submúltiplos de las unidades se forman mediante prefijos: .....	31
1.5.6 Algunas reglas de escritura de los nombres y símbolos de las unidades y prefijos. Expresión de los valores de las magnitudes.....	32
1.5.7 Sistema CGS Gaussiano. ....	36
1.5.8 El sistema práctico o QES. ....	38
1.5.9 El sistema MTS.....	39
1.5.10 El sistema MKS absoluto o Giorgi. ....	39
1.5.11 El sistema técnico o terrestre.....	40
1.5.12 Sistema de unidades inglés, imperial, anglosajón o FPS (por foot, poundal, second). ....	41
1.6 TIPOS DE CORRIENTE ELÉCTRICA.....	43
1.6.1 Fundamentos de electricidad. ....	43
1.6.1.1 Concepto de polaridad y carga eléctrica. ....	44
1.6.1.2 Electricidad Estática (Electrostática). ....	45
1.6.1.2.1 Separación de cargas por fricción o contacto. ....	46
1.6.1.2.2 Separación de cargas inducida por la presión .....	46
1.6.1.2.3 Separación de cargas inducida por la temperatura.....	46
1.6.1.2.4 Descarga electrostática. ....	47
1.6.2 El concepto de Fuerza. ....	48
1.6.2.1 Definición de la unidad de fuerza. ....	48
1.6.2.2 Fuerzas por contacto. ....	48
1.6.2.3 Fuerzas a distancia. ....	49
1.6.3 La ley de Coulomb. ....	50
1.6.3 La unidad de carga eléctrica. ....	51
1.6.3 Carga eléctrica del electrón.....	51
1.6.4 El concepto de campo. ....	52
1.6.4 El campo eléctrico. ....	52
Representación gráfica del campo eléctrico .....	53
Trabajo mecánico y trabajo fisiológico.....	54
1.6.5 Concepto de Trabajo mecánico ( $W$ , por “work” en inglés). ....	54
1.6.6 Energía.....	55
1.6.6 Cálculo de la energía cinética .....	56
1.6.6 Cálculo de la Energía potencial.....	56
1.6.6 Energía potencial eléctrica. ....	57
Un caso particular.....	58
1.6.7 Diferencia de Potencial eléctrico de un campo (Voltaje). ....	59

1.6.7 La unidad para el potencial eléctrico.....	59
1.6.8 La pila eléctrica de Volta.....	60
1.6.9 Analogía entre diferencia de potencial eléctrica e hidráulica. ....	61
1.6.10 La corriente eléctrica .....	61
1.6.11 Intensidad eléctrica: .....	62
1.6.11 La unidad de intensidad de corriente.....	62
1.6.12 Los dos tipos de corriente eléctrica de acuerdo a su carga eléctrica. ....	63
1.6.12 Sentido electrónico real y convencional de la corriente eléctrica.....	64
1.6.13 Corriente eléctrica directa (c.d.).....	64
1.6.14 Corriente alterna (c.a.). ....	65
1.6.15 Principio de generación de la corriente alterna senoidal.....	65
1.6.16 Otros tipos de corriente alterna. ....	67
1.7 CARACTERÍSTICAS DE LA CORRIENTE ALTERNA SINUSOIDAL. ....	68
1.7.1 Corriente directa pulsante.....	69
1.7.2 Corriente directa compuesta o mixta.....	69
1.8 CLASIFICACIÓN DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA DE ACUERDO AL TIPO DE INFORMACIÓN. (SEÑALES ELÉCTRICAS).....	70
1.9 CARACTERIZACIÓN DE UNA SEÑAL DE CORRIENTE ALTERNA. ....	71
1.9.1 Valor pico (o máximo) $V_m$ del voltaje de c.a. ....	71
1.9.2 Valor promedio (o c.d.) $V_{cd}$ del voltaje de una señal sinusoidal. ....	71
1.9.3 Valor rms del voltaje de c.a. ....	72
1.9.4 Valor promedio (o c.d.), $V_{cd}$ del voltaje de una onda senoidal rectificada. ....	73
1.9.4.1 Rectificada de media onda .....	73
1.9.4.2 Rectificador de onda completa con dos diodos. ....	73
1.10 LEY DE OHM.....	74
1.11 CIRCUITOS ELÉCTRICOS. ....	75
1.11.1 Circuito eléctrico en serie.....	77
1.11.2 Circuito eléctrico en paralelo. ....	77
1.11.3 Resistencia equivalente de un circuito en serie. ....	77
1.11.4 Resistencia equivalente de un circuito en paralelo.....	78
1.11.5 Las dos leyes de los circuitos eléctricos de Kirchhoff. ....	80
1.12 NORMAS DE SEGURIDAD EN LA MEDICIÓN DE VARIABLES ELÉCTRICAS.....	82
1.12.1 Descarga eléctrica: .....	82
1.12.2 Riesgos por al manejar de la electricidad .....	84
1.12.3 Accidentes eléctricos. Forma de producirse.....	84
1.12.4 Consejos básicos para usar con mayor seguridad a la electricidad.....	85
1.12.5 Seleccione el instrumento de medida adecuado: .....	87
1.12.6 Errores que suelen cometerse al usar instrumentos de medición de variables eléctricas .....	88
1.12.7 Los reglamentos de seguridad en los laboratorios de medidas eléctricas y electrónicas. ....	88



## UNIDAD 2 Instrumentos Básicos y Avanzados<sup>1</sup>

“Los fenómenos eléctricos empezaron a conocerse en épocas muy remotas, aunque no fue hasta finales del siglo XIX que se descubre al electrón y se define la teoría eléctrica que conocemos hoy.”

### 2.1. INTRODUCCIÓN.

### 2.2. FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN Y APLICACIÓN DE MEDIDORES ANALÓGICOS Y DIGITALES.

#### 2.2.1 Medidores analógicos

- 2.2.1.1. Galvanómetro D'Arsonval
- 2.2.1.2. Galvanómetro electrodinamómetro
- 2.2.1.3 Amperímetro.
- 2.2.1.4. Voltímetro
- 2.2.1.5 Óhmetro.
- 2.2.1.6 Medidores analógicos VOM de c.a. y c.d.

#### 2.2.1 Medidores Digitales.

- 2.1.2.1 Funcionamiento del DVM/DMM
- 2.1.2.2 Comparadores
- 2.1.2.3 Convertidores digital-analógico.
- 2.1.2.3 Red sumadora resistiva de peso binario.
- 2.1.2.3 La red sumadora resistiva en escalera.
- 2.1.2.3 Convertidores D/A multiplicadores.
- 2.1.2.4 Convertidores analógicos a digitales.
- 2.1.2.5 Conteo y codificación digital.
- 2.1.2.6 Dispositivos de despliegue.
- 2.1.2.7 Voltímetros digitales.
  - 2.1.2.7.1 Interpretación de las Especificaciones de Exactitud de los Voltímetros Digitales.
  - 2.1.2.7.2 Particularidades y Especificaciones Adicionales de los Voltímetros Digitales.

### 2.3. FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN Y APLICACIÓN DE OTROS INSTRUMENTOS DE MEDICION.

- 2.3.1. Osciloscopio analógico y digital.
- 2.3.2. Generador de señales.

### 2.1 INTRODUCCIÓN.

Esta unidad tiene la finalidad de analizar y explicar el funcionamiento y uso de instrumentos básicas en las mediciones eléctricas. Aquí se estudiarán los multímetros analógicos y digitales, el osciloscopio y el generador de señales.

El multímetro es un instrumento de mediciones eléctricas que da la posibilidad de medir distintas magnitudes eléctricas en el mismo aparato. Las magnitudes integradas en el multímetro mínimamente son: a) el voltímetro, b) el amperímetro, tanto de c.d. y c.a y c) el óhmetro.

---

<sup>1</sup> Programa de la asignatura actualizado. CIRCULAR No. M00.2.1/014/2016. TecNM. 06/06/ 2016.



Se trata de instrumentos de medición que pueden ser clasificados de forma general como analógicos o digitales. El multímetro analógico es predecesor de los multímetros digitales, y la diferencia principal entre ellos radica en el modo de presentar la información al usuario. En los multímetros analógicos, la magnitud medida es presentada mediante una carátula con una escala graduada y una aguja que se desplaza sobre ella, hasta obtener la lectura. Como tenemos que comparar la posición de la aguja con respecto a la escala, trae aparejado dos errores: el de apreciación (que depende del ojo o buena vista del operario) y el error de paralaje, por la desviación de la vista, que muchas veces no la ubicamos en la dirección perpendicular a la escala. A todo esto debemos sumarle el error de precisión del propio instrumento, lo cual hace evidente que resulta mucho más ventajosa la lectura en un multímetro<sup>2</sup> digital.

Con el propósito de lograr mayor comprensión, se incluyen algunos puntos de fundamentos de electricidad. La presencia de estos temas básicos permite obtener conceptos eléctricos que son útiles para que estos instrumentos sean empleados en forma razonada y menos mecánicamente.

## **2.2 FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN Y APLICACIÓN DE INSTRUMENTOS MEDIDORES ANALÓGICOS Y DIGITALES.**

### **2.2.1 Medidores analógicos de c.d.**

Este tipo de medidores emplea mecanismos electromecánicos (denominados galvanómetros tipo D'Arsonval<sup>3</sup>) para mostrar el valor o la cantidad de la magnitud que se está midiendo en una escala. Es decir, la salida es analógica debido a que la indicación la da la posición de una aguja.

Actualmente, los multímetros digitales han desplazado a la mayoría de los multímetros con mecanismos de D'Arsonval por diversas razones, principalmente la mayor exactitud, la eliminación de errores de lectura y la facilidad de su manejo. No obstante, todavía se emplean los medidores analógicos aun considerando sus limitaciones, por lo que resulta de mucha utilidad el estudio de los multímetros analógicos. Por ello se inicia este tema haciendo esta revisión del mecanismo básico de todos los instrumentos analógicos, el galvanómetro D'Arsonval.

#### **2.2.1.1 Galvanómetro D' Arsonval.**

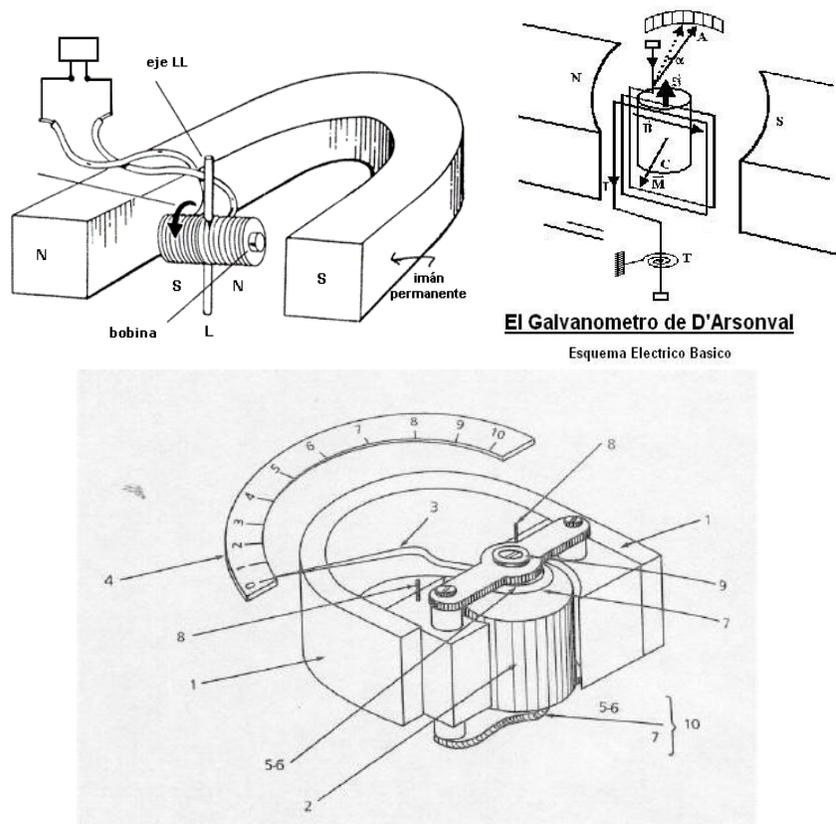
El mecanismo fundamental más común que se emplea en los amperímetros, voltímetros y óhmetros electromecánicos es un dispositivo detector de corriente llamado galvanómetro de D' Arsonval o mecanismo de imán permanente y bobina móvil (PMPC, por sus siglas en inglés). Este instrumento fue desarrollado por D'Arsonval en 1881. Su aplicación tan difundida se debe a su sensibilidad y exactitud extremas. Mediante instrumentos comerciales de este tipo se pueden detectar corrientes menores a  $1\mu$  A. El movimiento detecta la corriente empleando la fuerza que surge de la interacción de un campo magnético y la corriente que pasa a través de él. La fuerza se emplea para generar un desplazamiento mecánico, que se mide en una escala calibrada.

---

<sup>2</sup> También se usa el anglicismo "tester" (probador) para nombrar al multímetro.

<sup>3</sup> Jacques Arsène D'Arsonval (1851 - 1940) fue un biofísico e inventor francés, que ideó el galvanómetro de bobina móvil y el amperímetro termopar. Fue investigador importante en el campo de la electrofisiología; dedicándose durante buena parte del siglo XIX y principios del siglo XX al estudio de los efectos de la electricidad en los organismos biológicos.

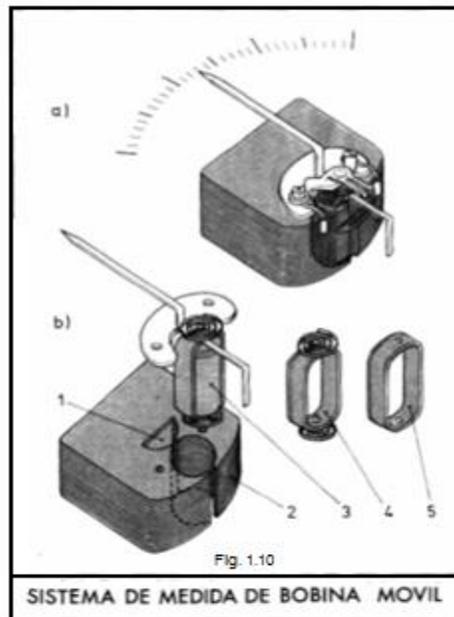
### 2.2.1.1.1 Construcción.



Esencialmente todos los tipos de galvanómetros contienen básicamente estos elementos:

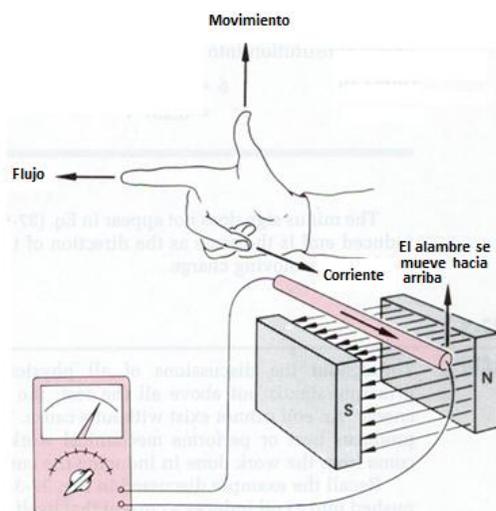
- 1.- Imán permanente o imán temporal
- 2.- Bobina móvil
- 3.- Aguja indicadora
- 4.- Escala en unidades según tipos de lecturas
- 5.- Pivotes
- 6.- Cojinetes
- 7.- Resortes
- 8.- Pernos de retención
- 9.- Tornillo de ajuste cero
- 10.- Mecanismo de amortiguamiento

En la figura 1.10a y 1.10b se muestra el conjunto y despiece de un sistema de bobina móvil de la firma Gossen. En ella podemos distinguir los siguientes componentes: El imán permanente (1), los recubrimientos polares (2), el núcleo de hierro de la bobina móvil (3), la bobina móvil sin el núcleo de hierro (4), y el marco de aluminio de la bobina móvil (5).



### 2.2.1.1.2 Principio de funcionamiento del galvanómetro.

Las cargas en el conductor (la corriente eléctrica,  $i$ ) que se mueven en forma perpendicular al flujo de un campo magnético experimentan una fuerza perpendicular tanto al flujo como a la dirección de movimientos de las cargas (este fenómeno físico de se le conoce describe la ley de Fleming, o comúnmente, como ley de la mano derecha. Como se puede ver en figura, la corriente que pasa por el conductor se debe al movimiento de cargas, esas cargas estarán sujetas a la fuerza magnética si la orientación del conductor dentro de un campo magnético es adecuada. La fuerza se transmite mediante las cargas eléctricas libres a todos y cada uno de los átomos del conductor; la suma total de esa fuerza obliga al conductor mismo a moverse en la dirección perpendicular al movimiento de las cargas.



La dirección de la fuerza en el conductor que lleva la corriente se encuentra fácilmente mediante la regla de la mano derecha. El dedo índice apunta en la dirección de la corriente convencional, el dedo medio apunta en la dirección del campo magnético y dedo pulgar señala la dirección de la fuerza y del movimiento del conductor. La ecuación vectorial que define a esta fuerza es:

$$F = i * L * B$$

Siendo  $F$  la fuerza en newton en el conductor,  $i$  es la corriente en amperes,  $L$  es la longitud del conductor en metros y  $B$  se representa la intensidad de campo magnético.

El mecanismo que patentó D' Arsonval se basa en este principio. Una bobina de alambre se fija en un eje que gira en dos cojinetes de joya<sup>4</sup>. La bobina puede girar en un espacio entre un núcleo cilíndrico de hierro suave y dos piezas polares magnéticas (o entrehierro). Las piezas polares crean el campo magnético y el núcleo de hierro obliga el paso del campo magnético a través del entrehierro. Si se aplica una corriente a la bobina, la fuerza resultante hará que gire. A este giro se oponen dos resortes pequeños que originan un par (fuerza giratoria) que se opone al par magnético. Las fuerzas de los resortes se calibran de modo que una corriente conocida origine una rotación de ángulo conocido. (Los resortes también sirven como conexiones eléctricas para la bobina.) El puntero liviano muestra la cantidad de rotación sobre una escala calibrada.

La desviación de la aguja es directamente proporcional a la corriente que fluye en la bobina, siempre que el campo magnético sea uniforme y la tensión del resorte también sea lineal. En ese caso, la escala del medidor también es lineal. La exactitud de los movimientos de D' Arsonval que se emplean en los medidores comunes de laboratorio es de aproximadamente el 1% de la lectura de la escala completa.

### 2.2.1.2 Galvanómetro electrodinamómetro

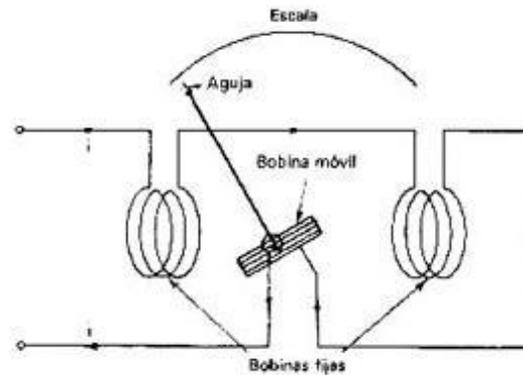
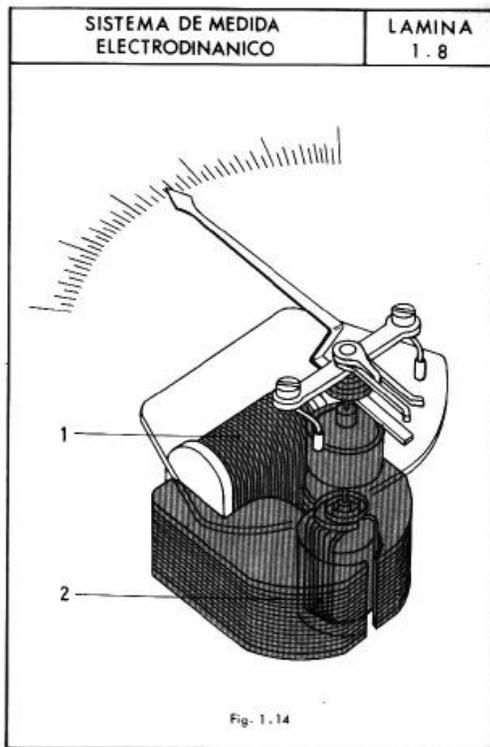
Otro mecanismo que se emplea en la construcción de voltímetros y amperímetros de gran exactitud, así como wáttmetros y medidores de factor de potencia es el electrodinamómetro. Al igual que el mecanismo de D'Arsonval, trabaja también como dispositivo sensor de corriente. Se puede obtener exactitudes muy altas con el empleo de este mecanismo porque no utilizan materiales magnéticos (los cuales poseen propiedades no lineales).

En contraste con el movimiento de D' Arsonval, que emplea un imán permanente como fuente del campo magnético, el electrodinamómetro crea un campo magnético con la corriente que mide. Esta corriente pasa por dos devanados del campo y establece el campo magnético que interacciona con la corriente en la bobina móvil. La fuerza en esa bobina, debido a los campos magnéticos de las bobinas fijas, hace que gire la bobina móvil. La bobina móvil se fija a un puntero que se mueve a lo largo de una escala cargada para indicar el valor de la cantidad que se esté midiendo. El conjunto completo del mecanismo se monta en una caja blindada de hierro para aislarlo de cualquier campo magnético parásito.

El mecanismo del electrodinamómetro produce una lectura de gran exactitud, pero está limitado debido a sus necesidades de potencia. El campo magnético de los devanados estacionarios, producido por una corriente de pequeña es mucho más débil que el campo permanente del movimiento de D' Arsonval.

---

<sup>4</sup> Los cojinetes, las joyas y los pivotes de son componentes miniatura usados en los instrumentos que requieren fricción baja, larga vida, y características no magnéticas. Se hacen generalmente del zafiro, del rubí, o del vidrio duro.

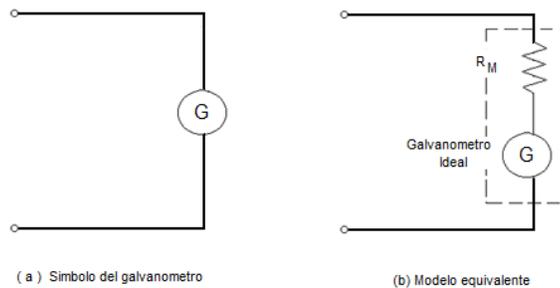


El sistema de medida electrodinámico es muy parecido al sistema de medida de bobina móvil. También está dotado de una bobina móvil, pero en lugar de un imán permanente posee una bobina de excitación. En la figura 1.14 se muestra un tipo constructivo muy utilizado. A través de dos muelles espirales, que también producen la fuerza antagónica, se envía corriente a la bobina móvil (2). La bobina de excitación (1) consta de pocas espiras de hilo grueso, y la bobina móvil de muchas espiras de hilo fino. Cuando el sistema de medida electrodinámico se utiliza para la medición de potencia, la tensión se aplica a la bobina móvil, o sea, la llamada bobina de tensión, mientras que la corriente se aplica a la bobina de excitación.

### 2.2.1.3 El amperímetro analógico de c.d.

Los galvanómetros electromecánicos industriales y de laboratorio se emplean como detectores básicos para medir corrientes del orden de microamperes ( $10^{-6}$  A) hasta varios cientos de amperes.

Para representar un amperímetro real en términos de circuito equivalente es un galvanómetro ideal (que se supone no tiene resistencia interna) en serie con una resistencia  $R_m$  (de igual valor que la resistencia de la bobina y los conductores del medidor).



**Fig. 4.10 Símbolo del galvanómetro y circuito equivalente.**

Corriente ( $I_m$ )	resistencia	voltaje
$50 \mu A$	1000-5000 $\Omega$	50 mV-250 mV
$500 \mu A$	100-1000 $\Omega$	50 mV-500 mV
1 m A	30-120 $\Omega$	30 mV-120 mV
10 m A	1-4 $\Omega$	10 mV-40 mV

**Tabla 4-1 Resistencia interna de galvanómetros D'Arsonval típicos.**

Para la medición de la intensidad de la corriente eléctrica el amperímetro debe conectarse en serie con la carga (figura 2.3). De esta forma la corriente que circula por la carga es la misma que circulará por el instrumento de medida. Naturalmente, el alcance de la medida del instrumento debe ser el adecuado. Un aparato cuya desviación completa de escala sea de 1 mA no deberá utilizarse para medir corrientes de 25 mA, puesto que no soportaría una corriente tan elevada, como tampoco podría utilizarse para medir una intensidad de corriente de pocos microamperes puesto que la aguja apenas se desviaría de su posición de reposo.

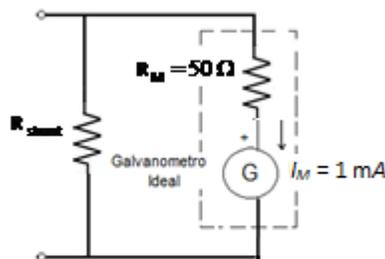


**Fig. 2.3**

La sensibilidad de un amperímetro<sup>5</sup> indica la corriente necesaria para una desviación de toda la escala. Los medidores comerciales utilizan galvanómetros que tienen sensibilidades tan pequeñas como  $1 \mu A$ . Para extender la capacidad de medición de los amperímetros de cd por encima de este límite superior se deben utilizar resistencias en derivación o shunts que disminuyan la sensibilidad del instrumento, lo cual producirá aumento del rango del medidor.

### 2.2.1.3.1 Ampliación del rango de un amperímetro.

Una derivación shunt (o paralelo) es una trayectoria de baja resistencia conectado en paralelo con el galvanómetro del medidor. El shunt permite que una fracción específica de la corriente que pasa por la rama del circuito a medir se desvíe del mecanismo del medidor. Si se determina con exactitud cómo se divide la corriente, la fracción de ésta que pasa por el galvanómetro puede usarse para indicar de forma indirecta la corriente total que pasa por la rama en la que se conecta el medidor.



**Ejemplo 1.2**

<sup>5</sup> La sensibilidad de un instrumento es la relación entre la respuesta del instrumento (número de divisiones recorridas) y el valor de la magnitud que estamos midiendo.

Para un galvanómetro, la sensibilidad viene dada por la deflexión de la aguja cuando por el instrumento circule una cantidad de corriente eléctrica de referencia. La unidad de este parámetro son 1/A. Si amperímetro se deflexiona al 100 % con una corriente de 1 mA, es más sensible en relación a otro que deflexiona 10 % de la escala para la misma corriente. El primero es diez veces más sensible en comparación al segundo.

### Ejemplo 2.1

Dado un galvanómetro de  $I_M = 1 \text{ mA}$  con una resistencia interna de bobina,  $R_M$  de  $50 \Omega$ , se desea usarlo como amperímetro capaz de medir hasta  $150 \text{ mA}$ . ¿Cuál será la resistencia shunt necesaria?

Solución:

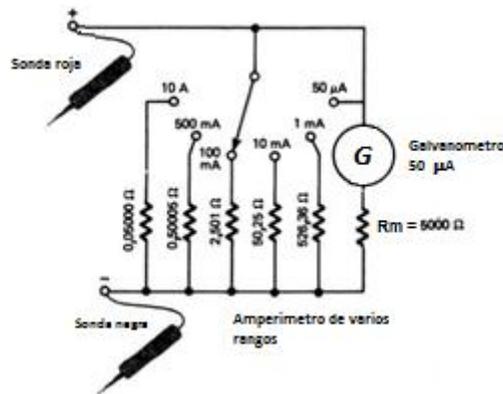
Si el galvanómetro puede manejar un máximo de  $1 \text{ mA}$ , el shunt tendrá que conducir el resto de la corriente. Así, para la desviación de escala completa.

$$\begin{aligned} I_{\text{shunt}} &= I_{\text{total}} - I_{\text{galvanometro}} \\ &= 150 - 1 \\ &= 149 \text{ mA} \end{aligned}$$

Como las caídas de voltaje a través del shunt y del galvanómetro son iguales (en virtud de estar conectadas en paralelo), entonces

$$\begin{aligned} V_{\text{shunt}} &= V_{\text{galvanometro}} \\ I_{\text{shunt}} R_{\text{shunt}} &= I_M R_M \\ R_{\text{shunt}} &= \frac{I_M \cdot R_M}{I_{\text{shunt}}} = \frac{(0.001)(50)}{0.149} = 0.32 \Omega \end{aligned}$$

Muchos amperímetros son instrumentos de varios rangos. Algunos de estos utilizan varias terminales de conexión externas (bornes) como medio de cambiar rango, otros utilizan un interruptor de rotación o llave.



#### 2.2.1.3.2 El derivador de Ayrton.

El derivador por "shunts" presenta ciertos inconvenientes: al cambiar de rango, el conmutador selector de rango desconecta momentáneamente de las resistencias derivadoras, por lo que, el total de la corriente a medir puede pasar por el galvanómetro lo cual provocaría el deterioro del instrumento. Para eliminar este problema se puede aplicar un sistema que se conoce como *derivador universal* o *derivador de Ayrton*

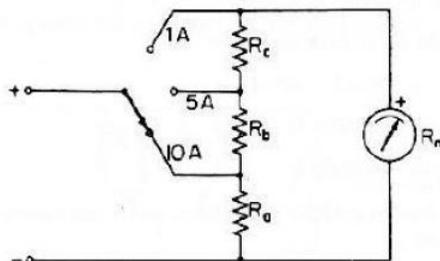


Figura 3-14. Derivador universal o derivador de Ayrton.

### Ejemplo 2.2.

Diseñe un amperímetro con derivación de Ayrton para escalas de corriente de 1 A, 5 A y 10 A. Se utiliza un galvanómetro d'Arsonval a una corriente de deflexión a escala completa de 1 mA y con una resistencia interna de  $R_m = 50 \Omega$ , y se utiliza la configuración de la Fig. 3-14

**Para la escala de 1 A:**  $R_a + R_b + R_c$  están en paralelo con la bobina móvil de  $R_m = 50 \Omega$ . Dado que el movimiento necesita 1 mA para la deflexión de escala completa, por lo que se requiere que circule una corriente de derivación igual a

$$I_s = I - I_m = 1 \text{ A} - 1 \text{ mA} = 999 \text{ mA}$$

$$R_s = R_a + R_b + R_c = \frac{I_m \cdot R_m}{I_s} = \frac{1 \text{ mA} \cdot 50 \Omega}{999 \text{ mA}} = 0.05005 \Omega \quad (I)$$

**Para la escala de 5 A:**  $R_a + R_b$  están en paralelo con  $R_c + R_m$  ( $R_m = 50 \Omega$ ). En este caso habrá una corriente de 1 mA a través de la bobina móvil y la resistencia  $R_c$  en serie, así como 4999 mA a través de  $R_a + R_b$ .

$$I_s = I - I_m = 5 \text{ A} - 1 \text{ mA} = 4999 \text{ mA}$$

$$R_s = R_a + R_b = \frac{I_m \cdot (R_c + R_m)}{I_s} = \frac{1 \text{ mA} \cdot (R_c + 50 \Omega)}{4999 \text{ mA}} \quad (II)$$

**Para la escala de 10 A:**  $R_a$  sirve como derivación y  $R_b + R_c$  están en serie con la bobina móvil. La corriente a través de ella es otra vez 1 mA y en la derivación circulan los restantes 9999 mA. La ecuación anterior da:

$$I_s = I - I_m = 10 \text{ A} - 1 \text{ mA} = 9999 \text{ mA}$$

$$R_s = R_a = \frac{I_m \cdot (R_b + R_c + R_m)}{I_s} = \frac{1 \text{ mA} \cdot (R_b + R_c + 50 \Omega)}{9999 \text{ mA}} \quad (III)$$

Al resolver las tres ecuaciones simultáneamente (I), (II), (III) se obtiene:

$$\begin{aligned} 4999 \cdot (I) &: 4999 \cdot R_a + 4999 \cdot R_b + 4999 \cdot R_c = 250.2 \\ \text{-----} (II) &: 4999 \cdot R_a + 4999 \cdot R_b - R_c = 50 \\ R_s = R_a + R_b + R_c &= \frac{I_m \cdot R_m}{I_s} = \frac{1 \text{ mA} \cdot 50 \Omega}{999 \text{ mA}} = 0.05005 \Omega \end{aligned}$$

Al restar (II) de (I) se obtiene:

$$\begin{aligned} 5000 \cdot R_c &= 200.2 \\ R_c &= 0.04004 \Omega \end{aligned}$$

Similarmente,

$$\begin{aligned} 9999 \cdot (I) &: 9999 \cdot R_a + 9999 \cdot R_b + 9999 \cdot R_c = 500.45 \\ \text{-----} (III) &: 9999 \cdot R_a - R_b - R_c = 50 \end{aligned}$$

Al restar (III) de (I) se obtiene:

$$10000 \cdot R_b + 10000 \cdot R_c = 450.45$$

La sustitución del valor calculado de  $R_c$  en esta expresión da:

$$10000 \cdot R_b = 450.45 - 400.4$$

$$R_b = 0.005005 \Omega$$

$$R_a = 0.005005 \Omega$$

Estos cálculos indican que para corrientes grandes los valores de las resistencias de derivación pueden ser muy pequeños.

#### 2.2.1.4 Voltímetros analógicos de c.d.

La mayoría de los voltímetros analógicos emplean también el mecanismo de D' Arsonval. Este mecanismo se puede considerar en sí mismo un voltímetro, si se considera que la corriente que pasa por él, multiplicada por su resistencia interna, origina una determinada diferencia de potencial o voltaje. Para aumentar el voltaje que se puede medir mediante ese instrumento, se agrega una resistencia más en serie a la resistencia propia del medidor. La resistencia adicional (que se llama resistencia multiplicadora) limita la corriente que pasa por el circuito del medidor.

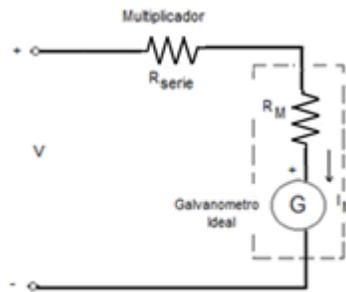


Figura 1-1. Voltímetro básico de CD.

#### Ejemplo 2.3

Se emplea un galvanómetro de 0-1 mA y  $R_M = 50 \Omega$  de resistencia interna como voltímetro para una escala de 0-10 V, ¿qué resistencia se debe colocar en serie con el dispositivo?

**Solución:**

A escala máxima, pasa 1mA por el medidor. Si se han de medir 10 V, la resistencia total necesaria es:

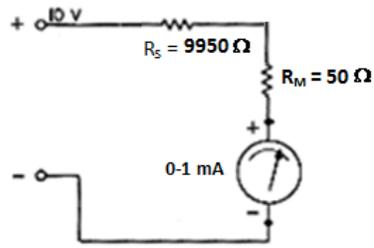
$$R_T = \frac{V}{I_M} = \frac{10V}{0.001A} = 10,000\Omega$$

Como la resistencia del galvanómetro es  $50 \Omega$ , la resistencia agregada debe ser

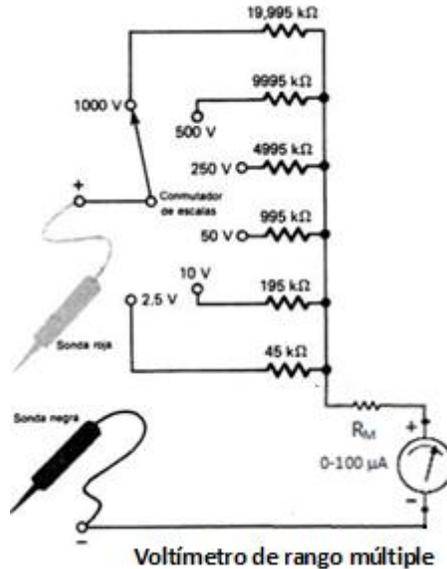
$$R_S = R_T - R_M$$

o

$$R_S = 9950 \Omega$$



Para construir un voltímetro de rango múltiple, se puede emplear un interruptor que conecte resistencias de varias magnitudes en serie con el galvanómetro. Los voltímetros típicos de corriente directa (CD) de laboratorio tienen exactitudes de  $\pm 1\%$  de la escala completa.



### Sensibilidad de un voltímetro.

La sensibilidad de un voltímetro se puede especificar utilizando la definición general dada al concepto, que sería el voltaje necesario para la deflexión de escala completa. Pero aquí se usa ampliamente otro criterio de sensibilidad, que es la de ohms por volts. Para cada rango de voltaje, la resistencia total ofrecida por el voltímetro,  $R_T$ , se divide por el voltaje a plena escala y el cociente se llama sensibilidad. Este cociente es una constante del voltímetro. El valor de la sensibilidad  $S$  se puede calcular como el recíproco de la sensibilidad de corriente del galvanómetro usado en el voltímetro.

### Ejemplo 2.4.

¿Cuál es la sensibilidad de un voltímetro que emplea (a) un galvanómetro de 1 mA, (b) un galvanómetro de 50 mA?

$$(a) \text{ Sensibilidad (ohms / voltio) del voltímetro} = \frac{1}{I_M} = \frac{1}{0.001 \text{ A}} = 1,000 \frac{\Omega}{\text{voltio}}$$

$$(b) \text{ Sensibilidad (ohms / voltio) del voltímetro} = \frac{1}{I_M} = \frac{1}{0.00005 \text{ A}} = 20,000 \frac{\Omega}{\text{voltio}}$$

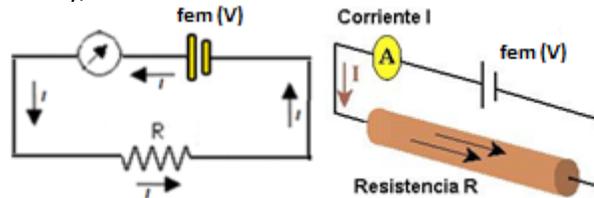
Un valor de la sensibilidad ohms/voltio mas grande, es una indicación de que el voltímetro real se aproxima al comportamiento de un voltímetro ideal, que tiene un relación de ohms/voltio infinita. Los voltímetros de laboratorio típicos tienen una razón de 20,000 ohms/voltio.

El ejemplo muestra que el voltímetro con la relación ohmios/voltio más alta dará la lectura más confiable, a causa del error por efecto de carga. Podemos determinar la sensibilidad que un voltímetro debe tener para reducir el error

hasta un determinado porcentaje de la lectura verdadera. Se hace señala también que el error por efecto de carga puede ocurrir cuando se trate de medir voltajes en circuitos de alta resistencia. En estos casos, únicamente se pueden obtener lecturas exactas con voltímetros electrónicos los cuales tienen resistencias de entrada del orden de 10 MΩ o más. Como regla general, se tiene que para reducir el error por efecto de carga en las lecturas del voltímetro a menos del uno por ciento, la resistencia del voltímetro debe ser por lo menos 100 veces más grande que la resistencia del circuito a través del cual se está midiendo el voltaje.

### 2.1.1.5 Óhmetro.

Así, un óhmetro es un instrumento que mide de manera directa la resistencia de elementos eléctricos o la continuidad de un circuito. La unidad para la resistencia es el ohm. Su principio de funcionamiento está en medir la corriente por medio de un galvanómetro, y el resultado se interpreta como resistencia. Los óhmetros se configuran habitualmente en circuitos tipo serie y/o derivación.



#### 2.1.1.5.1 Óhmetro serie simple

El óhmetro tipo serie simple consta de un galvanómetro o mecanismo D'Arsonal conectado en serie con una resistencia, una batería y un par de terminales a los cuales se conecta la resistencia desconocida. Esta configuración de óhmetro es similar a un voltímetro con una resistencia serie variable conectada a una fuente de tensión constante. La corriente que circula a través del galvanómetro depende de la magnitud de la resistencia desconocida y la indicación del medidor es proporcional a su valor.

En la figura 2 se indica la forma de realizar las conexiones y los elementos del óhmetro:

$R_s$  = resistencia variable limitadora de corriente.

$V$  = batería interna.

$R_m$  = resistencia interna del galvanómetro d' Arsonal.

$R_x$  = resistencia desconocida, se conecta entre A y B.

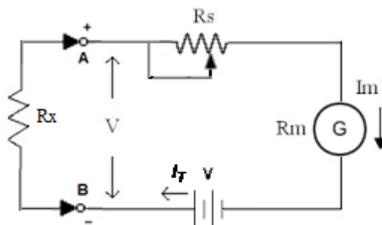


Figura 2. Diseño de un óhmetro.

#### 2.1.1.5.2 Construcción de la carátula del óhmetro por medio de la tabla de calibración.

Si la resistencia  $R_x$  es cero (cuando se cortocircuitan las terminales A y B), entonces el galvanómetro debe estar protegido para que no se produzca una corriente más grande que la máxima permitida; este es el propósito de la resistencia  $R_s$ .

Si la intensidad máxima permitida por el galvanómetro es  $I_m = 100$  mA, su resistencia interna  $R_m = 20$  Ω y  $V = 4$  V, se determina el valor de la resistencia  $R_s$ :

$$V = I_m(R_s + R_m + R_x)$$

$$R_S = \frac{V}{I_m} - (R_m + R_x)$$

$$R_S = \frac{4}{100 \times 10^{-3}} - (20 + 0)$$

$$R_S = 20 \Omega.$$

Así, con una resistencia  $R_x = 0 \Omega$  debe pasar por el galvanómetro 100 mA y la aguja indicará el último punto de la escala, con lo cual este punto señala el valor cero en la escala de medición de resistencias ( $\Omega$ ).

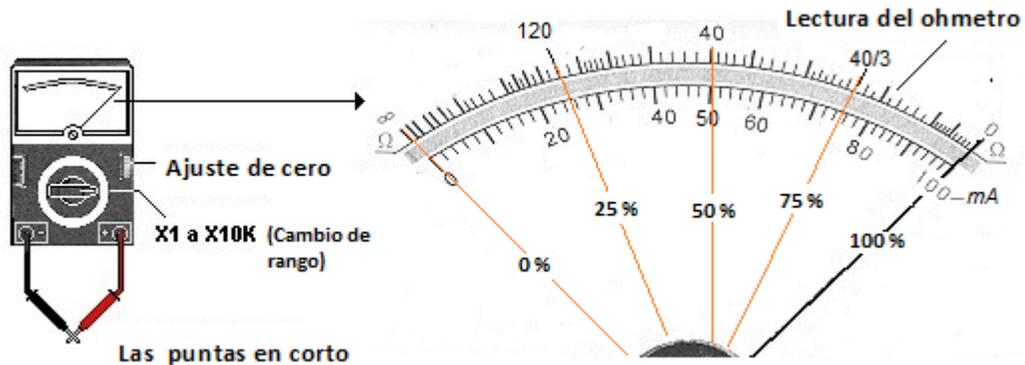


Figura 3. Caratula del óhmetro tipo serie.

De forma análoga, si las puntas A y B están abiertas, es decir, que la resistencia  $R_x$  es infinita, el galvanómetro indicará una corriente nula ( $I_m = 0$  mA) y su posición deberá corresponder con la marca  $\infty$  (infinito) en la escala de medición de resistencias. Los valores que hay entre 0 e  $\infty$  se localizan yendo de derecha a izquierda. Si nos fijamos en la figura 2, la resistencia total del circuito es

$$R_T = R_S + R_M + R_x$$

Si  $R_x = 0 \Omega$ , entonces

$$I_m = \frac{V}{R_T} = \frac{V}{R_S + R_M} = \frac{4}{40} = 100 \text{ mA}$$

Si se conecta una resistencia  $R_x = 40 \Omega$  entre A y B,

$$I_m = \frac{V}{R_T} = \frac{V}{R_S + R_M + R_x} = \frac{4}{80} = 50 \text{ mA}$$

La corriente en el galvanómetro se reduce a la mitad, significando que el valor  $R_x = 40 \Omega$  en la escala de resistencia caerá justo en la marca de 50 % de la escala de corriente. Este valor  $R_x$  que produce que la corriente del galvanómetro se reduzca a la mitad de  $I_m$  define un parámetro del óhmetro denominado resistencia característica del óhmetro  $R_0$

$$\text{Entonces, } R_0 = R_S + R_M$$

Y que

$$I_m = \frac{V}{R_0}$$

La corriente a cualquier valor de  $R_x$

$$I_x = \frac{V}{R_0 + R_x}$$

El porcentaje de deflexión de la aguja indicadora se determina como

$$D(\%) = \frac{I_x}{I_m} \cdot 100 \%$$

$$D(\%) = \frac{V}{\frac{R_0 + R_x}{R_0}} \cdot 100 \%$$

$$D(\%) = \frac{R_0}{R_0 + R_x} \cdot 100 \%$$

A partir de la ecuación anterior se puede construir la siguiente tabla:

Deflexión $D$ (%)	0	25	50	75	100
$R_x$ ( $\Omega$ )	$\infty$	$3R_0$	$R_0$	$\frac{R_0}{3}$	0

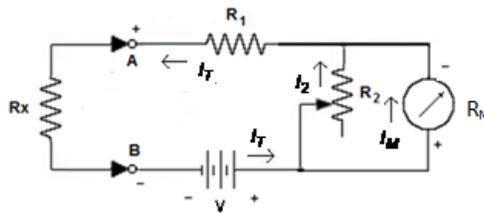
**Tabla de calibración.**

Una característica de la escala de resistencias es que las divisiones no son proporcionales, *no es una escala lineal*, sino es una escala logarítmica.

Para obtener medidas por encima de  $120 \Omega$  se necesitaría un galvanómetro más sensible, lo cual es un inconveniente de este tipo de circuitos.

### 2.1.1.5.3 Óhmetro tipo serie con ajuste de cero.

La figura 4-17 muestra los elementos de un óhmetro tipo serie de un solo rango. Consta de un galvanómetro D'Arsonal conectado en serie con una resistencia  $R_1$  y una batería  $V$ , con un par de terminales (A-B) a los cuales se conecta la resistencia desconocida  $R_x$ . La corriente que circula a través del galvanómetro depende de la magnitud de la resistencia desconocida y la indicación del medidor es proporcional a su valor, siempre y cuando se hayan tomado en cuenta los ajustes de calibración. Otros elementos del circuito que deben tomarse en cuenta son  $R_M$ , la resistencia interna del galvanómetro d' Arsonal, y  $R_2$ , que es una resistencia de calibración que ajusta a deflexión máxima de la aguja indicadora del medidor.



**Figura 4-17. Óhmetro tipo serie.**

Cuando la resistencia desconocida  $R_x = 0$  (las terminales A y B están en cortocircuito), la corriente  $I_T$  es máxima. En estas condiciones, la resistencia de derivación  $R_2$  se ajusta hasta que el galvanómetro indique corriente a escala completa ( $I_M$ ). En la posición de la aguja para la corriente de escala completa se marca "0  $\Omega$ ". En forma similar, cuando  $R_x = \infty$  (las terminales A y B están abiertas), la corriente en el circuito es cero y el galvanómetro indica cero corriente, esta posición se marca con " $\infty$ " en la escala. Habrá posiciones intermedias en la escala para diversos valores de resistencia  $R_x$  en las terminales del instrumento. La exactitud de estas marcas dependerá de los parámetros internos del medidor.

Aun cuando el óhmetro tipo serie es un diseño popular y se utiliza extensamente en los instrumentos portátiles para servicio general, tiene ciertas desventajas. La más importante se relaciona con la disminución del voltaje de la batería interna debida al tiempo y al uso, de forma que la corriente a escala completa disminuye y el medidor no indicará "0" cuando A y B están en cortocircuito. La resistencia de derivación  $R_2$  provee un ajuste para contrarrestar el efecto de la descarga de la batería. Sería posible ajustar la aguja en corriente a escala completa ( $I_M$ ) por medio de un ajuste en  $R_1$  (eliminando a  $R_2$ ), pero esto cambiaría la calibración en todo el rango. El ajuste de  $R_2$  es una mejor solución, ya que la

resistencia equivalente del paralelo de  $R_2$  y la resistencia del galvanómetro  $R_M$  siempre es baja comparada con  $R_1$ , y por consiguiente el cambio requerido en  $R_2$  para el ajuste no cambia mucho de calibración. El circuito de la figura 4-17 no compensa por completo el envejecimiento de la batería,<sup>6</sup> pero realiza un buen trabajo dentro de los límites esperados de exactitud del instrumento.

Una parámetro conveniente para el diseño de un óhmetro tipo serie es el valor de  $R_x$  que origina la deflexión a media escala en medidor ( $1/2 I_M$ ). Esta resistencia se define como la resistencia característica del óhmetro,  $R_0$ .

A continuación se analiza el circuito a partir de los siguientes parámetros: la corriente a escala completa  $I_M$ , la resistencia interna del galvanómetro  $R_M$ , el voltaje de la batería  $V$  y el valor deseado de la resistencia de media escala  $R_0$ ; a partir de esto, se pueden calcular los valores de  $R_1$  y  $R_2$ .

Primero, se analiza el circuito considerando  $R_x = 0 \Omega$  para producir la deflexión a plena escala  $I_M$

$$\text{Por definición, } R_0 = R_1 + \frac{R_M R_2}{R_M + R_2}$$

$$R_1 = R_0 - \frac{R_2 R_M}{R_2 + R_M} \quad (\text{I})$$

$$I_T = \frac{E}{R_1 + \frac{R_M R_2}{R_M + R_2}} \quad \text{o}$$

$$I_T = \frac{E}{R_0} \quad (\text{II})$$

Siguiendo en el circuito de la figura 4

$$I_2 = I_T - I_M \quad (\text{III})$$

$$I_2 = \frac{E}{R_C} - I_M \quad (\text{IV})$$

El voltaje en la resistencia  $R_2$  es igual al voltaje en el galvanómetro

$$I_2 R_2 = I_M R_M$$

$$R_2 = \frac{I_M R_M}{I_2} \quad (\text{V})$$

Sustituyendo (IV) en (V)

$$R_2 = \frac{I_M R_M}{\frac{V}{R_0} - I_M} = \frac{I_M R_M R_0}{V - I_M R_0}$$

$$R_2 = \frac{I_M R_M R_0}{V - I_M R_0} \quad (\text{VI})$$

Sustituyendo (VI) en (I)

$$R_1 = R_0 - \frac{\frac{I_M R_M R_0}{V - I_M R_0} R_M}{\frac{I_M R_M R_0}{V - I_M R_0} + R_M}$$

<sup>6</sup> El rendimiento y operación de las baterías actuales ha reducido considerablemente este factor de error.

$$R_1 = R_0 - \frac{\frac{I_M R_M R_0}{V - I_M R_0} R_M}{\frac{I_M R_M R_0 + R_M (V - I_M R_0)}{V - I_M R_0}}$$

$$R_1 = R_0 - \frac{I_M R_M R_0 R_M}{I_M R_M R_0 + R_M (V - I_M R_0)}$$

$$R_1 = R_0 - \frac{I_M R_M R_0 R_M}{V R_M}$$

Finalmente

$$R_1 = R_0 - \frac{I_M R_M R_0}{V} \quad (\text{VII})$$

### Ejemplo 2.5.

El óhmetro de la figura 4—17 utiliza un mecanismo PMMC (según las siglas en inglés, mecanismo de imán permanente y bobina móvil) de  $50 \Omega$  básico que requiere una corriente de  $1 \text{ mA}$  a escala completa. El voltaje de la batería interna es de  $3 \text{ V}$ . La resistencia que provoca una deflexión de media escala es de  $2000 \Omega$ . Calcúlese a) los valores de  $R_1$  y  $R_2$ ; b) el valor máximo de  $R_2$ , para compensar, la caída del  $10 \%$  de voltaje de la batería; c) el error de escala en la marca de media escala ( $2000 \Omega$ ) cuando  $R_2$  está en la posición dada en b).

**SOLUCION.** a) La corriente total de la batería para la deflexión a escala completa es

$$I_T = \frac{V}{R_0} = \frac{3 \text{ V}}{2000 \Omega} = 1.5 \text{ mA} \quad (\text{II})$$

La corriente a través de la resistencia de ajuste a cero  $R_2$  es entonces

$$I_2 = I_T - I_M = 1.5 \text{ mA} - 1 \text{ mA} = 0.5 \text{ mA}$$

El valor de la resistencia de ajuste a cero  $R_2$  es

$$R_2 = \frac{I_M \cdot R_M}{I_2} = \frac{1 \text{ mA} \times 50 \Omega}{0.5 \text{ mA}} = 100 \Omega \quad (\text{V})$$

La resistencia del paralelo del mecanismo y el resistor de derivación ( $R_p$ ) es

$$R_p = \frac{R_2 \cdot R_M}{R_2 + R_M} = \frac{50 \times 100}{150} = 33.3 \Omega$$

El valor de la resistencia limitadora de corriente  $R_1$  es

$$R_1 = R_0 - R_p = 2000 - 33.3 = 1966.7 \Omega$$

b) A la caída del  $10 \%$  de voltaje de la batería,

$$V = 3 \text{ V} - 0.3 \text{ V} = 2.7 \text{ V}$$

La corriente total de la batería  $I_T$  es

$$I_T = \frac{V}{R_0} = \frac{2.7 \text{ V}}{2000 \Omega} = 1.35 \text{ mA}$$

La corriente de la derivación  $I_2$  es

$$I_2 = I_T - I_M = 1.35 \text{ mA} - 1 \text{ mA} = 0.35 \text{ mA}$$

y la resistencia de ajuste a cero  $R_2$  es igual a

$$R_2 = \frac{I_M \cdot R_M}{I_2} = \frac{1 \text{ mA} \times 50 \Omega}{0.35 \text{ mA}} = 143 \Omega$$

c) La resistencia del paralelo de la bobina móvil del medidor y el nuevo valor de  $R_2$  es

$$R_p = \frac{R_2 \cdot R_M}{R_2 + R_M} = \frac{50 \times 143}{193} = 37 \Omega$$

Como la resistencia de media escala  $R_0$  es igual a la resistencia del circuito interna total,  $R_0$  se incrementa a

$$R_0 = R_1 + R_p = 1966.7 \Omega + 37 \Omega = 2003.7 \Omega$$

Por lo tanto, el valor verdadero en la marca de media escala del medidor es 2003.7 W, aunque el medidor esté marcado en la escala con 2000 W. El porcentaje de error es entonces

$$\% \text{ error} = \frac{2000 - 2003.7}{2003.7} \times 100 \% = -0.185 \%$$

El signo negativo indica que la lectura del medidor está debajo de la verdadera.

#### 2.1.1.5.4 Óhmetro tipo derivación.

Este consiste de una batería en serie con una resistencia de ajuste  $R_1$  y un galvanómetro D'Arsonal. La resistencia desconocida  $R_x$  se conecta a través de las terminales A y B, en paralelo con el medidor. Para este circuito es necesario tener un interruptor  $SW_1$  que desconecte la batería cuando no se use el instrumento. Cuando la resistencia desconocida  $R_x = \infty \Omega$  (A y B están abiertas), la corriente circulará únicamente a través del medidor y con una apropiado ajuste del valor de  $R_1$ , se debe lograr que la aguja del galvanómetro marque escala completa. De esta forma, el óhmetro marca "infinito" en el lado derecho de la escala (corriente de deflexión a plena escala). Cuando las puntas A y B están en corto ( $R_x = 0 \Omega$ ), no circula corriente en galvanómetro, el lado izquierdo de la escala marca "cero ohms".

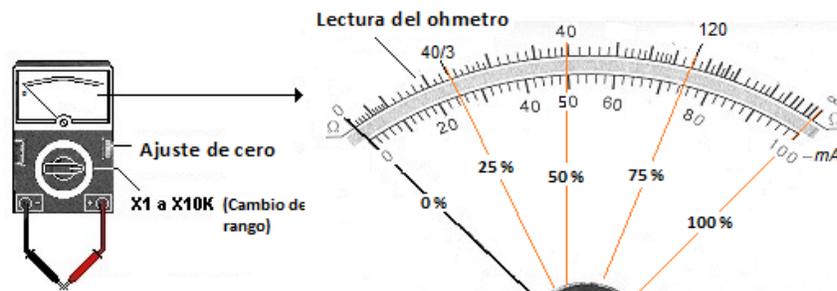
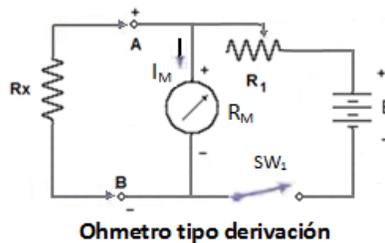


Figura 4. Caratula del óhmetro tipo derivación.

El **Óhmetro tipo derivación** es adecuado para medir valores bajos de resistencia; no se suele emplear en los instrumentos de prueba, pero se encuentra en los laboratorios o para aplicaciones especiales de medición de resistencia baja.

El análisis del óhmetro tipo derivación es similar al del óhmetro tipo serie. La corriente de deflexión a plena escala del medidor es

$$I_M = \frac{E}{R_1 + R_M} \quad (4-19)$$

Donde:

E = voltaje de la batería interna.

R<sub>1</sub> = resistencia limitadora de corriente.

R<sub>M</sub> = resistencia interna del galvanómetro.

I<sub>M</sub> = Corriente de deflexión a plena escala del galvanómetro.

Al despejar R<sub>1</sub> se tiene

$$R_1 = \frac{E}{I_M} - R_M$$

Para cualquier valor de R<sub>x</sub> conectado a través de las terminales del medidor, la corriente por el medidor decrece y está dada por la ley del divisor de corriente:

$$I_x = \frac{E}{R_1 + \left[ \frac{R_M \cdot R_x}{R_M + R_x} \right]} \times \frac{R_x}{R_M + R_x}$$

o

$$I_x = \frac{E \cdot R_x}{R_1 \cdot R_M + R_x (R_1 + R_M)} \quad (4-21)$$

La corriente del medidor para cualquier valor de R<sub>x</sub>, expresada como una fracción de la corriente a escala completa es

$$S = \frac{I_x}{I_M} = \frac{R_x (R_1 + R_M)}{R_1 \cdot (R_M + R_x) + (R_M \cdot R_x)}$$

o

$$S = \frac{R_x (R_1 + R_M)}{R_x \cdot (R_M + R_1) + (R_M \cdot R_1)} \quad (4-22)$$

Definiendo

$$R_p = \frac{R_1 \cdot R_M}{R_1 + R_M} \quad (4-23)$$

Y sustituyendo la ecuación 4-23 en la ecuación 4-22, se obtiene

$$S = \frac{R_x}{R_x + R_p} \quad (4-24)$$

Si se utiliza la ecuación (4-24), el medidor se calibra calculando S en términos de R<sub>x</sub> y R<sub>p</sub>. Para la lectura de media escala del medidor ( I<sub>x</sub> = 0.5 I<sub>M</sub> ) la ecuación (4-21) se reduce a

$$\frac{1}{2} \cdot I_M = \frac{E \cdot R_O}{R_1 \cdot R_M + R_O (R_1 + R_M)} \quad (4-25)$$

Donde R<sub>O</sub> = resistencia externa que produce media deflexión. Para determinar los valores sobre la escala para un valor de R<sub>1</sub>, la lectura de media escala se puede encontrar dividiendo la ecuación 4—19 entre la 4—25 y al despejar para R<sub>O</sub>:

$$R_0 = \frac{R_1 \cdot R_m}{R_1 + R_m}$$

El análisis muestra que la resistencia de media escala está determinada por la resistencia limitadora  $R_1$  y la resistencia interna del galvanómetro  $R_M$ . La resistencia limitadora,  $R_1$ , a su vez está determinada por la resistencia del medidor  $R_M$  y por la corriente de deflexión a plena escala  $I_M$ .

### Ejemplo 2.6.

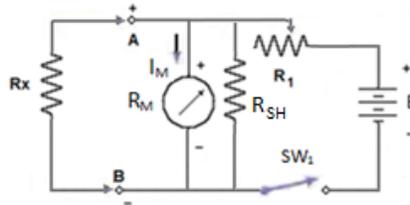


Figura 4-18. Ejemplo 2.6.

En el circuito de la figura 4-18 se utiliza un galvanómetro D'Arsonval de 10 mA y con una resistencia interna de 5  $\Omega$ . El voltaje de la batería  $E = 3$  V. Se desea modificar el circuito aumentando una resistencia apropiada  $R_{SH}$  a través del galvanómetro, de tal forma que el instrumento indique 0.5  $\Omega$  en el punto medio de su escala. Calcúlese a) el valor de la resistencia de derivación,  $R_{SH}$ ; b) el valor de la resistencia limitadora de corriente,  $R_1$ .

**SOLUCION** a) Para la deflexión a plena escala del galvanómetro,

$$I_m = 0.5 \cdot I_M = 5 \text{ mA}$$

El voltaje a través del galvanómetro es

$$E_m = 5 \text{ mA} \times 5 \Omega = 25 \text{ mV}$$

Ya que el voltaje también aparece a través de la resistencia desconocida,  $R_x$ , la corriente a través de ésta es

$$I_x = \frac{25 \text{ mV}}{0.5 \Omega} = 50 \text{ mA}$$

La corriente que circula en el galvanómetro ( $I_m$ ) más la que circula por la derivación ( $I_{SH}$ ) debe ser igual a la corriente que circula por la resistencia desconocida ( $I_x$ ). Por lo tanto

$$I_{SH} = I_x - I_m = 50 \text{ mA} - 5 \text{ mA} = 45 \text{ mA}$$

La resistencia derivadora es

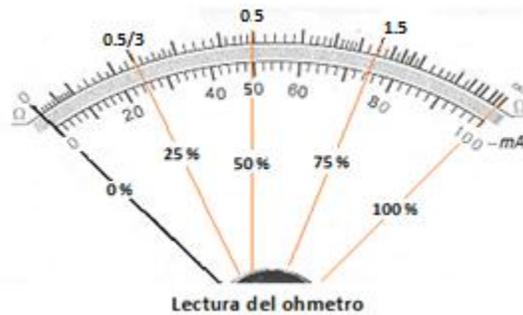
$$R_{SH} = \frac{E_m}{I_{sh}} = \frac{25 \text{ mV}}{45 \text{ mA}} = \frac{5}{9} \Omega$$

b) La corriente de la batería total es

$$I_T = I_m + I_{SH} + I_x = 5 \text{ mA} + 45 \text{ mA} + 50 \text{ mA} = 100 \text{ mA}$$

La caída de voltaje a través de la resistencia limitadora  $R_1$  es igual  $3 \text{ V} - 25 \text{ mV} = 2.975 \text{ V}$ . Por tanto

$$R_{sh} = \frac{2.975 \text{ V}}{100 \text{ mA}} = 29.75 \Omega$$



### 2.1.1.6 Multímetros analógicos de c.a. y c.d.

Las señales eléctricas que cambian en amplitud y dirección periódicamente a través del tiempo se miden con los medidores de corriente alterna (c.a.). Estos medidores pueden responder al valor pico, promedio, o efectivo de las señales periódicas de corriente alterna que se les aplique. Como resultado, si se debe efectuar mediciones exactas de señales de c.a., se deben seguir los lineamientos que se dan a continuación. Primero, se debe considerar qué valor característico de la onda se busca (promedio, pico o efectivo). A continuación, si es posible, se selecciona un medidor que responda y que esté calibrado para indicar su salida en esa característica. Si ello no fuera posible, es necesario calcular un factor de corrección entre la indicación que se obtiene y el valor buscado de la característica. Sin embargo, si este es el caso, probablemente sea más fácil y más exacto observar y medir el valor de la característica deseada de la onda real con un osciloscopio o analizador de espectro y no con un voltímetro o amperímetro analógico.

Los multímetros son instrumentos de medición que dan la posibilidad de medir distintas magnitudes eléctricas en el mismo instrumento. Las magnitudes integradas en el multímetros mínimamente son: a) el voltímetro, b) el amperímetro, y c) el óhmetro, por ello se debe que también se les conozca con VOM.

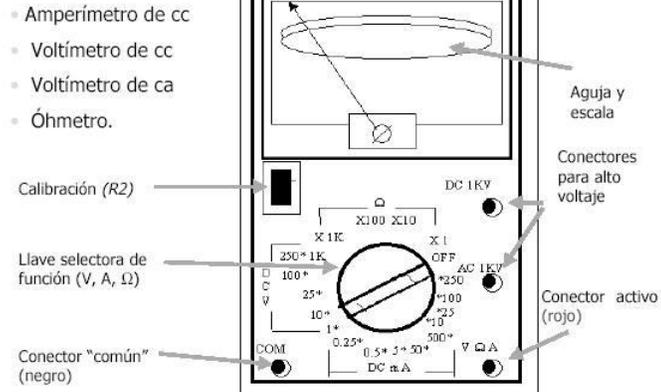
El indicador de las mediciones es un galvanómetro; éste convierte una señal de corriente eléctrica en un desplazamiento de una aguja indicadora sobre una escala. Es un dispositivo que opera con corriente de c.d. (corriente directa). Por lo tanto, si se necesita conocer el valor de una corriente de c.a. el valor de la variable a medir se debe convertir a un valor equivalente de corriente de c.d.. Debido a esto, el multímetro requiere de distintos circuitos para convertir el voltaje, la corriente y la resistencia a una corriente de c.d. en el rango definido para el galvanómetro.

Las señales eléctricas de c.a. (corriente alterna) que cambian en amplitud y dirección periódicamente a través del tiempo se miden con los medidores de c.a.. Estos medidores pueden responder al valor pico, promedio, o eficaz de las señales periódicas de corriente alterna que se les aplique. Esos medidores se calibran para indicar sus salidas en términos de los valores característicos de señales de c.a. Se debe considerar qué valor característico de la onda se busca (promedio, pico o eficaz). A continuación, se selecciona el medidor que responda y que esté calibrado para indicar su salida en esa característica. Si ello no fuera posible, se necesita calcular un factor de corrección entre la indicación que se obtiene y el valor deseado de la característica. Sin embargo, en ese caso probablemente sea más fácil y más exacto observar y medir el valor de la característica deseada de la onda real con un osciloscopio o analizador de espectro.

Como se ha expuesto, el amperímetro, el voltímetro y el óhmetro utilizan en común un galvanómetro D'Arsonval, y se diferencian entre sí por el circuito utilizado para acondicionar la magnitud a medir. Por lo tanto se construyen instrumentos que realizan las tres funciones de medición. Para seleccionar el circuito que se desea utilizar.

En la siguiente figura se muestra un multímetro o volt-ohm-miliamperímetro (VOM) comercial.

## Multímetros analógicos (téster)



El diagrama a bloques para un VOM c.d., es:

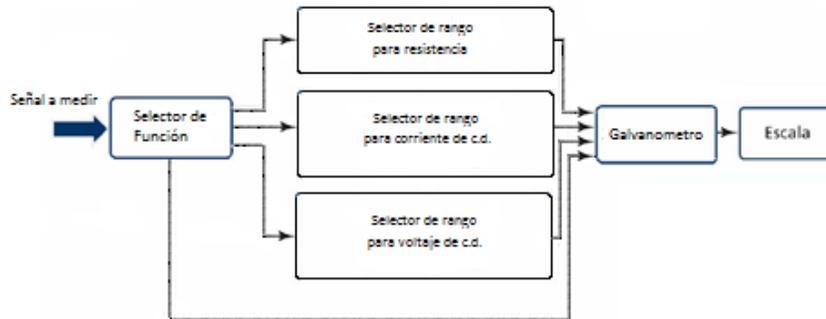


Diagrama a bloques de un VOM analógico de c.d.

El diagrama eléctrico básico, para la medición de las tres principales magnitudes eléctricas en c.d., es:

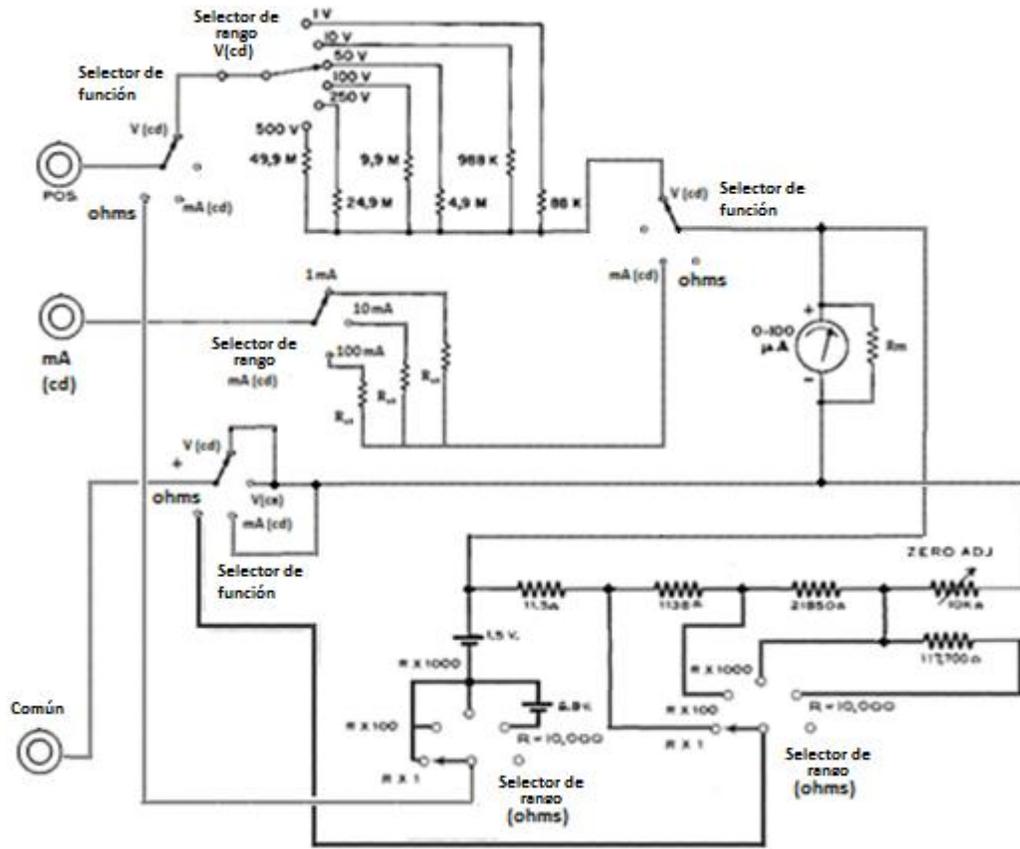


Diagrama a eléctrico de un VOM analógico de c.d.

Cuando se requiere medir voltaje de corriente alterna, se necesita agregar el circuito rectificador en serie con el galvanómetro.

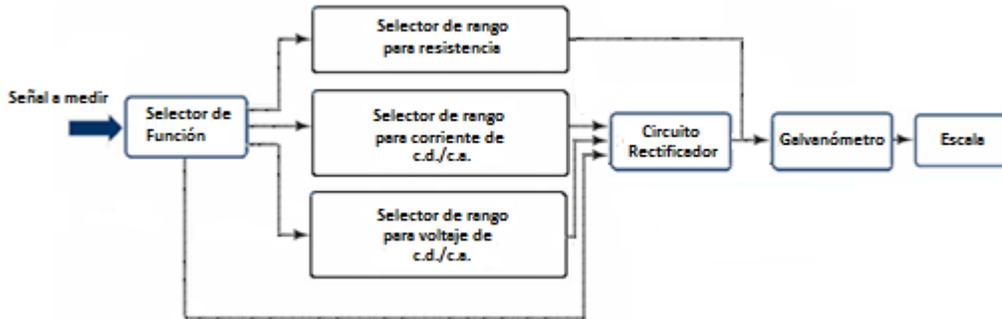


Figura 4.15 Diagrama a bloques del multímetro analógico c.d./c.a.

Para construir un medidor de voltaje en c.d. y c.a. se puede usar el siguiente circuito:

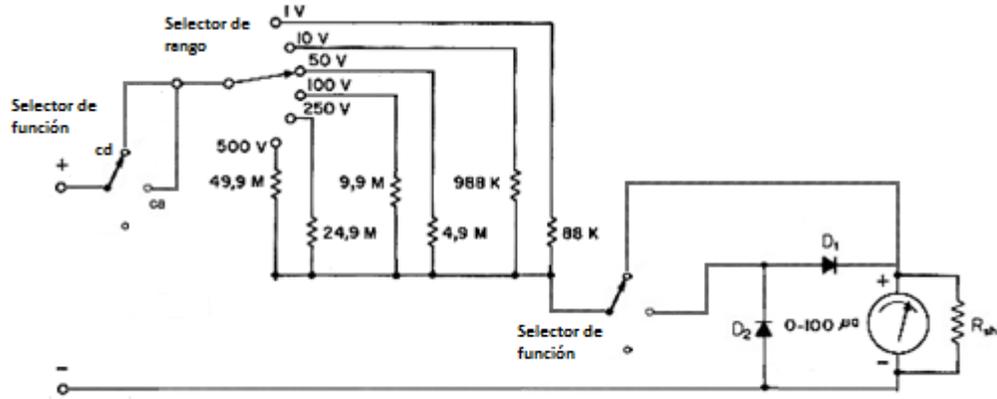
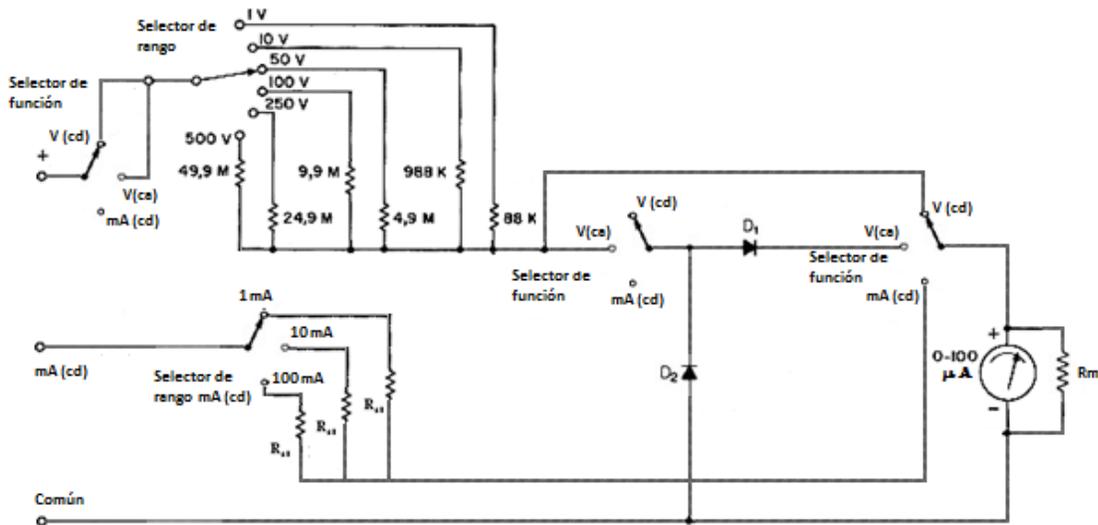
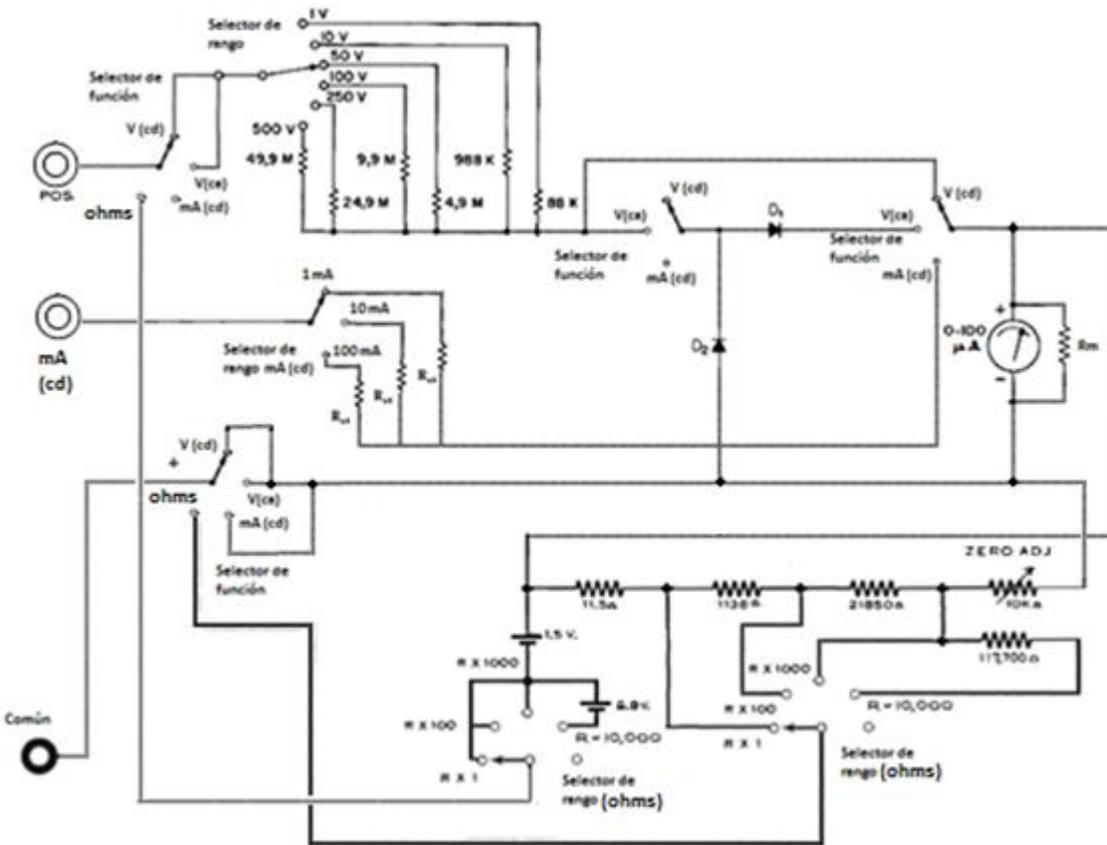


Figura 4.15 Diagrama eléctrico del voltímetro analógico c.d./c.a.

A continuación se muestra un diagrama eléctrico de un multímetro, el cual se le ha agregado la función de medir la intensidad de corriente en c.d.



Finalmente, en el diagrama de a continuación, se muestra un multímetro VOM, el cual permite hacer mediciones de las tres principales magnitudes eléctricas, voltajes, corrientes (en c.d. y c.a.) y resistencias.



Los multímetros analógicos son instrumentos de laboratorio y de campo muy útiles y versátiles, capaces de medir voltaje en corriente alterna (C.A.) y corriente directa (C.D.), corriente, resistencia, ganancia de transistor, caída de voltaje en los diodos, capacitancia e impedancia.

Este tipo de medidores emplea mecanismos electromecánicos para mostrar la cantidad que se está midiendo en una escala continua. Es decir, el proceso que realizan es analógico y la salida es analógica (agujas).

Los multímetros digitales han tomado el lugar de la mayoría de los multímetros con movimientos de D' Arsonval por dos razones principales: mejor exactitud y eliminación de errores de lectura.

Por otro lado, todavía se emplean los medidores analógicos que incorporan movimientos de D' Arsonval, ya que se emplean todavía para aplicaciones en las que se deben observar las indicaciones de muchos medidores de un vistazo. Por ejemplo, la mayoría de las subestaciones de servicio eléctrico emplean medidores analógicos que tratan de recordar 30 números y sus valores de seguridad.

### 2.2.2 Medidores Digitales.

El medidor electrónico digital (abreviado DVM para voltímetro digital o DMM para multímetro digital) indica digitalmente, el valor y el rango de la magnitud eléctrica que se está midiendo en una pantalla numérica, en lugar de la aguja de un galvanómetro.

Están diseñados para medir magnitudes como: voltajes de c.d. o c.a., intensidad de corrientes c.d. o c.a., capacitancia, resistencia, inductancia, conductancia, voltaje en un diodo, conductancia y accesorios para medir temperatura, presión y corrientes mayores a 500 amperes. Entre los primeros aparatos de este tipo, que alcanzaron mayor popularidad, están los fabricados por la compañía Hewlett-Packard, en la línea HP 3440A (1963). La lectura numérica proporciona a los medidores electrónicos digitales las siguientes ventajas sobre los instrumentos analógicos:



**Figura 1-4. Primeros DVM populares en la instrumentación digital.**

La exactitud de los voltímetros electrónicos digitales DVM es mucho mayor que la de los medidores analógicos. Por ejemplo, la mejor exactitud de los medidores analógicos es de aproximadamente 0.5% mientras que las exactitudes de los voltímetros digitales pueden ser de 0.005% o mejor. Aun los DVM y DMM más sencillos tienen exactitudes de al menos  $\pm 0.1\%$ .

Se eliminan errores humanos como el paralaje o equivocaciones en la lectura. Para cada lectura hecha, se proporciona un número definido y todos los observadores cualquiera siempre verán el mismo valor.

La lectura numérica aumenta la velocidad de captación del resultado y hace menos tediosa la tarea de tomar las mediciones. Esto puede ser una consideración importante en situaciones donde se deben hacer un gran número de lecturas.

La precisión de los voltímetros digitales DVM es mayor, y aumenta cuando se aumenta el número de dígitos desplegados. El voltímetro digital DVM también puede contener un control de rango y polaridad automáticos que los protejan contra sobrecargas o de polaridad invertida.

La salida del voltímetro digital DVM se puede alimentar directamente a elementos de registro (impresoras, graficadores o memorias) donde se haga un registro permanente de las lecturas (se muestra en la figura 1.5). Estos

datos registrados están en forma adecuada para ser procesados mediante computadoras digitales. Con la llegada de los circuitos integrados (CI), se ha reducido el costo de los voltímetros digitales hasta el punto en que algunos modelos sencillos tienen hoy precios bajos comparados con los de medidores analógicos convencionales. La mayoría de los multímetros digitales son instrumentos portátiles de baterías.



Fig.1.5 Trabajando un DVM HP-3440A conectado a una impresora para llevar el registro de un voltaje de un circuito.

### 2.2.2.1 Significado de " $\frac{1}{2}$ " dígito en un DVM.

Este es momento propicio para describir el " $\frac{1}{2}$ " dígito en las especificaciones de los voltímetros y multímetros digitales. Es frecuente que se diga que el DVM trabaja " $3\frac{1}{2}$ " a dígito, " $4\frac{1}{2}$ " dígito, etc. Si una pantalla del voltímetro digital muestra un " $\frac{1}{2}$ " dígito, significa que el dígito más significativo de la pantalla del DVM/DMM sólo puede mostrar un "0" o un "1", mientras que los demás dígitos pueden tomar valores de "0" a "9". El " $\frac{1}{2}$ " dígito sólo se encenderá si se rebasa el rango básico del instrumento en menos de 100 por ciento. Por ejemplo, si un voltímetro digital de  $3\frac{1}{2}$  dígitos se ajusta a su rango de 1.0 V y se le aplica un voltaje de 1.536 V, la pantalla mostrará 1.536 V aun cuando el rango de la pantalla de 1.0 V (0.999V) se haya rebasado. Un voltímetro digital de tres dígitos sólo podría marcar 0.999V en respuesta a la misma señal.

### 2.2.2.2 Funcionamiento del DVM/DMM

La Figura 1-6 muestra el diagrama de bloques de un multímetro digital, el cual, al compararse con el diagrama a bloques del multímetro analógico de la Figura 4.15, puede observarse que el cambio esencial entre un tipo y otro, es el sistema de indicación de la medida. Esta parte lo constituyen los bloques de conversión A/D y la pantalla o display alfanumérico, que convierten las señales analógicas medidas a la forma digital.

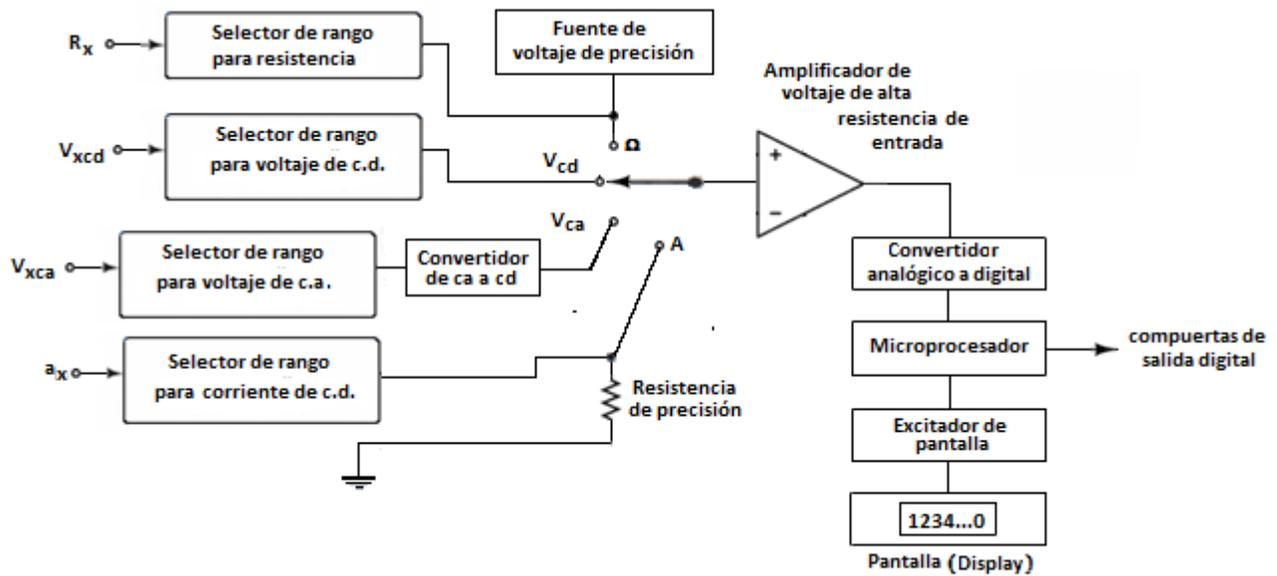


Figura 1-6. Diagrama a bloque de un multímetro digital.

La parte primordial de los DVM y DMM es el circuito que convierte la señal analógica a medir en forma digital. Estos circuitos de conversión se llaman convertidores *analógicos-digitales* (A/D). Por lo tanto, será necesario describir básicamente la operación de los convertidores A/D más usados. También es necesario ver los circuitos que convierten a las señales digitales en forma analógica (D/A), o sea, los convertidores digitales a analógicos (D/A). Por último, se examinarán los circuitos y dispositivos que se emplean en los medidores digitales para *desplegar* (o Display) la información de la medición.

Para explicar la operación de los convertidores A/D y D/A, será necesario hacer referencias a dispositivos y circuitos que se tratarán en otros cursos. Por lo tanto, la explicación que aquí se dé sobre estos dispositivos, es muy elemental.

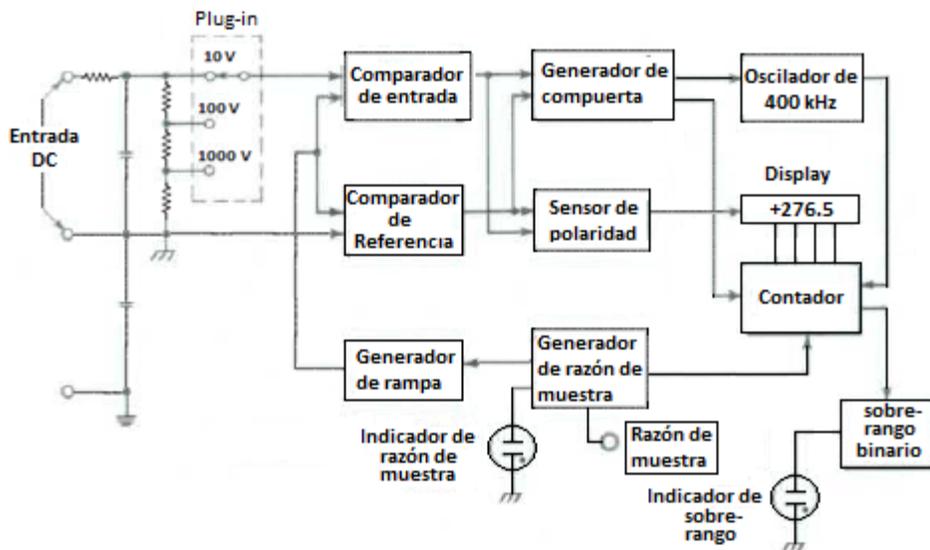
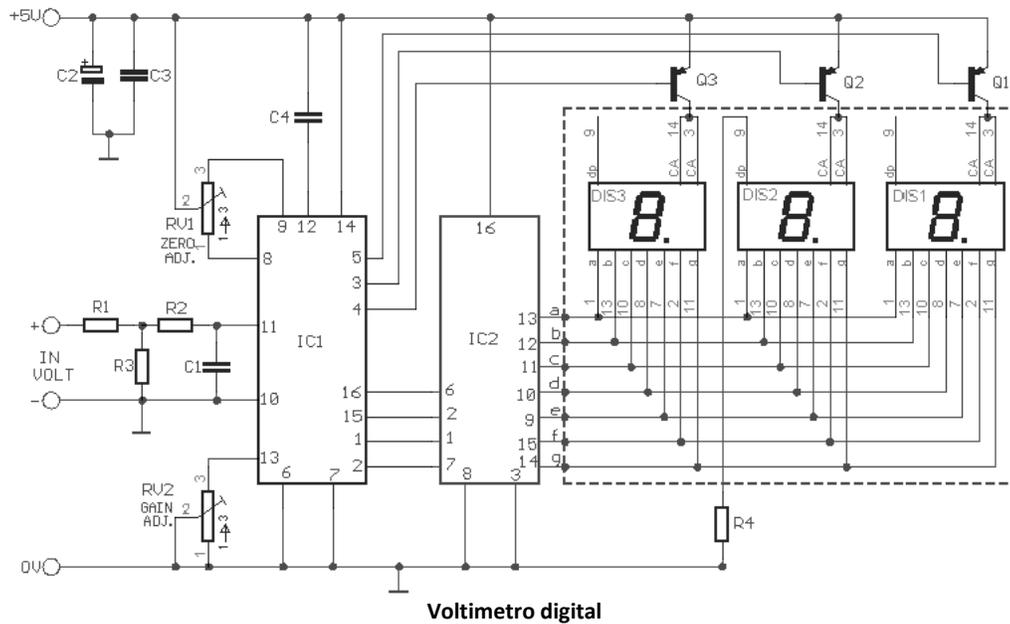


Figura 1-7. Diagrama a bloques del DVM, HP 3440A.



Componentes:	Valor
R1	680 Kohms
R2	1 Mohms
R3	6,8 Kohms
R4	270 ohms
RV1	50 K ohm (potenciómetro)
RV2	5 K ohm (potenciómetro)
C1	10 nF
C2	47 uF . 16V
C3	100 nF
C4	220 nF
IC1	CA3162E
IC2	CA3161E
Q1=Q2=Q3 Transistores:	BC557
3 Displays de 7 segmentos	ANODO COMUN

### 2.2.2.2.1 Comparadores.

Todos los convertidores A/D emplean uno o más *comparadores* como parte del proceso de digitalización. Un comparador es un dispositivo cuya señal de salida indica si un voltaje de entrada,  $V_{ent}$  es mayor o menor que un voltaje de referencia  $V_R$  (figura 5-2). Esto es, si  $V_{ent}$  en la figura 5-2 es menor que  $V_R$ , la salida del comparador es  $V_H$  como se muestra en la figura 5-2 b). Si es  $V_{ent}$  mayor que  $V_R$ , la salida es  $V_L$ . Entonces, la salida de un comparador se encuentra en uno de dos estados,  $V_R$  o  $V_H$ . Esto significa que se obtiene una salida digital a partir de una entrada analógica. La salida depende del voltaje de la fuente de alimentación o batería ya que los comparadores se operan en el modo saturado.<sup>7</sup> Si se emplea un amplificador operacional típico como comparador, su salida sólo llegará hasta 1.5 volts de los extremos del voltaje de la fuente de alimentación (*rieles* de la fuente de alimentación). Por ejemplo, si se usan la tierra y una batería de 9 volts (9 Vcd) como fuente de alimentación de un solo comparador de amplificador operacional, el  $V_H$  será de aproximadamente 7.5 Vcd, y  $V_L$  será de aproximadamente 1.5 Vcd. Sin embargo, se pueden conseguir comparadores especiales que permiten que el voltaje de salida  $V_H$  y  $V_L$  oscilen dentro de un rango de milivolts con respecto al riel de la fuente de alimentación.

<sup>7</sup> El valor del voltaje de saturación con frecuencia es muy similar al voltaje de alimentación del amplificador

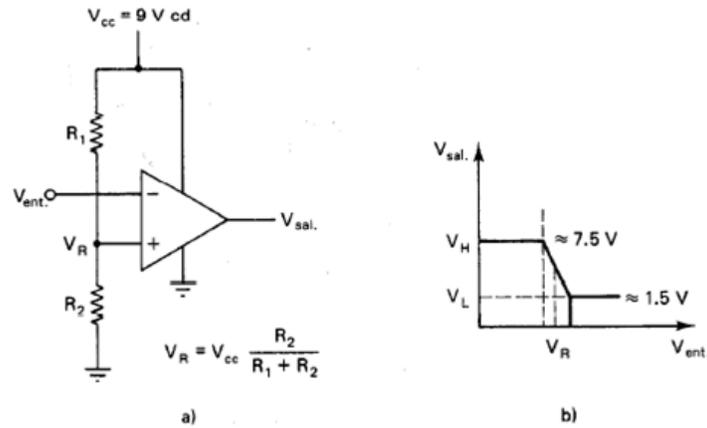


Figura 5-2 Comparador.

### 2.2.2.2.2 Convertidores digital-analógico.

Como lo indica el nombre, los convertidores digital a analógico (DAC) (iniciales de las palabras en inglés) son circuitos que convierten las señales digitales en cantidades eléctricas analógicas relacionadas en forma directa con el número de entrada codificado digitalmente. Se describirá el funcionamiento de los DAC antes de abordar a los convertidores analógicos a digital (ADC), debido a que los DAC son componentes clave para la mayor parte de los convertidores A/D. Los DAC también se emplean en muchas otras aplicaciones, incluyendo los sistemas de presentación (displays), sintetizadores de voz, y actuadores de control de procesos. Además, son dispositivos que ayudan a que las computadoras se comuniquen con el mundo analógico. Por ejemplo, la señal de salida digital de una computadora no se puede emplear en forma directa para hacer funcionar una válvula de control de flujo de gas a un horno.

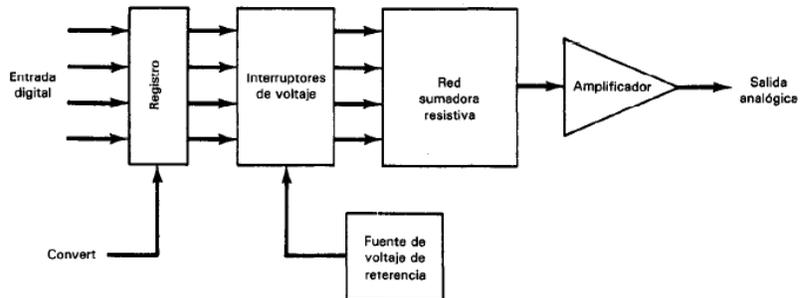


Figura 5.3 Convertidor D/A

Los convertidores D/A pueden efectuar sus conversiones en forma paralela o en serie. Por ejemplo, en instrumentación (como los osciloscopios de almacenamiento digital) por lo común necesitan de la alta velocidad de la operación en paralelo. Las aplicaciones de control de procesos (como el llenado de frascos con pastillas) se pueden efectuar en forma lenta o en serie. En general, se considera muy lento un tiempo de conversión de 1 milisegundo, pero muy rápido para un proceso industrial típico. Como la cantidad de entrada al convertidor D/A es un número digital, todas las técnicas de conversión convierten al número en un número correspondiente de unidades de corriente (lo más usual), voltaje o carga, para sumar después esas unidades con un circuito sumador analógico.

En La figura 5-3 se muestra un diagrama de bloques de un circuito básico de conversión de digital a analógico. El número digital a la entrada que se va a convertir, se alimenta al *registro de entrada* del convertidor D/A al recibir un comando externo CONVERT. (El registro está diseñado para aceptar una entrada digital sólo durante la duración del comando CONVERT. Después de la adquisición, el registrador mantiene constante ese número digital hasta que se reciba otro comando CONVERT.) Las salidas del registro alimentan al número digital de entrada a interruptores de voltaje que dan una de dos salidas posibles, 0 volts o el valor de la fuente de voltaje de precisión utilizada como

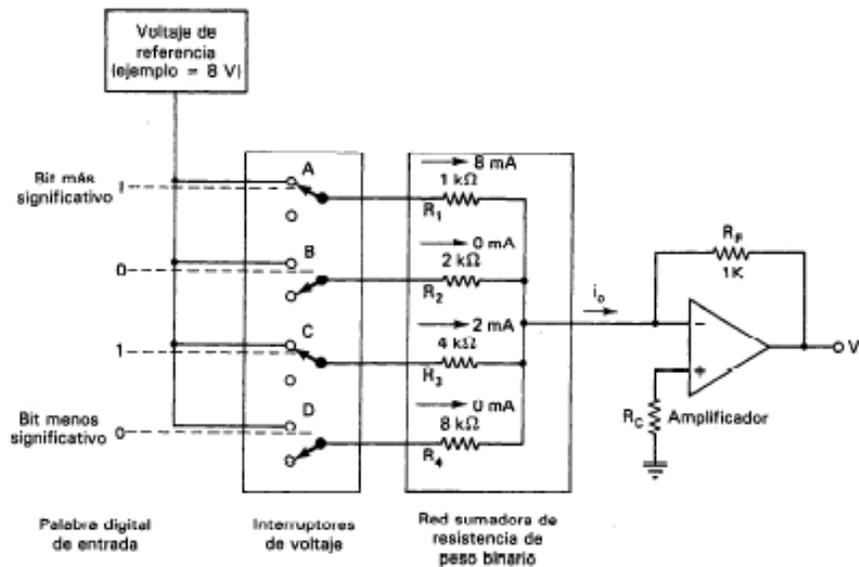
referencia. Así, esos interruptores son el equivalente a un interruptor ordinario de un polo y doble tiro (por lo común en la forma de interruptores transistorizados) controlado mediante las señales binarias que manda el registro. Los interruptores dan acceso a una red sumadora resistiva (sobre la cual se darán más detalles en las secciones siguientes) que convierte cada bit en su valor pesado de corriente y a continuación los suma obteniendo una corriente total. El valor total se alimenta entonces a un amplificador que efectúa dos funciones: conversión de corriente a voltaje y escalamiento de la salida.

Los dos tipos de redes sumadoras resistivas más comunes son la de resistencia pesada binaria y la de escalera (o  $R - 2R$ ).

#### 2.2.2.2.1 Red sumadora resistiva de peso binario.

Estas redes (figura 5-4) se emplean en los convertidores digital a analógico menos complejos, pero son difíciles de fabricar debido a las resistencias especiales y al valor ideal de la resistencia  $R_c$  compensadora de desviación, que es distinto para cada palabra digital. La magnitud de la corriente proporcional al valor de cada bit en la palabra digital de entrada se genera mediante el voltaje de referencia,  $V_{REF}$ , dividido entre la resistencia de peso de precisión,  $R_n$ , o  $I_n = V_{REF}/R_n$ . El peso de las resistencias es el correspondiente al código binario directo (8, 4, 2, 1 para un convertidor D/A de 4 bits), teniendo el bit más significativo en un convertidor de 4 bits, una resistencia con un peso de un octavo del valor de la resistencia del bit menos significativo. Por ejemplo, si el convertidor de la figura 5-4 tuviera una señal de entrada de 0000, los interruptores ABCD estarían todos abiertos y la salida del convertidor sería 0 mA. Si la palabra digital de entrada es 1010 (como es el caso de la figura 5-4), la salida sería  $8 + 0 + 2 + 0 = 10$  mA. Debido a que no fluye corriente en ninguna de las dos entradas de un amplificador ideal, toda la corriente pasa a través de la resistencia de realimentación  $R_f$  produciendo una salida de -10 volts. Para simplificar el análisis, supóngase que ambas terminales de entrada están al mismo potencial. La terminal positiva está a una tierra virtual, porque no pasa corriente a través de  $R_c$ .

Para los convertidores D/A de resistencia pesada binaria con más bits de resolución, se ve que se requieren mayores rangos de valores de resistencia a medida que aumenta el número de bits (p. ej., para un convertidor de 8 bits como el que muestra la figura 5-4, la resistencia del bit menos significativo necesitaría ser de 128 k $\Omega$  y para uno de 12 bit se necesitarían 2.096 M $\Omega$ ). El amplio rango de valores de resistencia limita seriamente la utilidad de los circuitos de resistencia de peso binario. Esto se debe a que las tolerancias de las resistencias que deben existir para que los convertidores logren conversiones exactas son difíciles de mantener a lo largo de amplios rangos de valores de resistencia. Además, las necesidades de potencia varían inversamente al valor de la resistencia. En un circuito convertidor D/A de 4 bits, esto significa que si se emplea una resistencia de  $\frac{1}{8}$  W para el bit menos significativo, se necesitará una de 1 W para el bit más significativo. Por ejemplo, supóngase que en la figura 5-4 se usa una resistencia de 1 por ciento para  $R_1$  (es decir,  $R_1$  es 1000 ohms). Para la misma exactitud en la salida, la exactitud de  $R_4$  debe ser de 0.125 por ciento. Surge otra dificultad del hecho de que los valores de resistencia no son estándar. Esto requiere que todas las resistencias se recorten con láser en un circuito integrado.



#### 2.2.2.2.2 La red sumadora resistiva en escalera.

La red sumadora resistiva en escalera supera en gran parte los problemas de los tipos resistivos de peso binario. El circuito resistivo en escalera (al que también se le conoce como escalera **R-2R**) se muestra en las figuras 5-5 y 5-6. Nótese que sólo se necesitan dos valores de resistencia, lo que hace ideal a este circuito para fabricación de circuitos integrados. La magnitud de la resistencia se ajusta según las características de entrada del amplificador.

Para explicar la operación de este circuito, se analizará usando el Teorema de Superposición. Esto se hace suponiendo que una señal de entrada ( $V_{REF}$ , véase la figura 5-6) sólo se aplica a una entrada a la vez y todas las demás entradas están en cero.

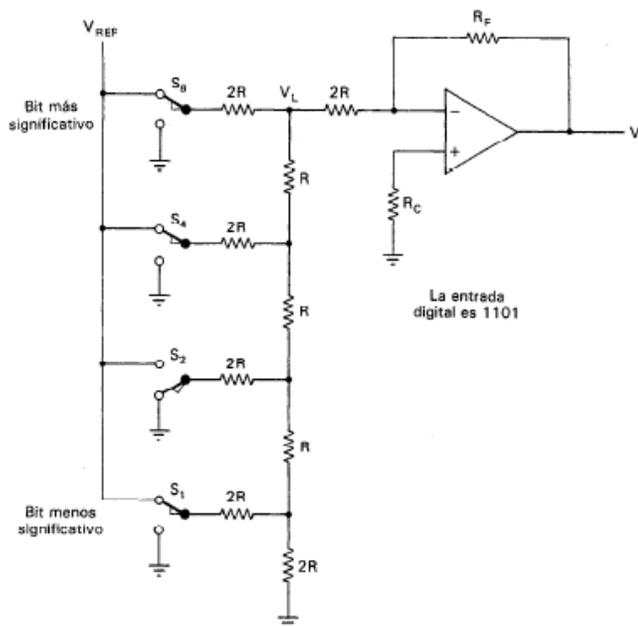
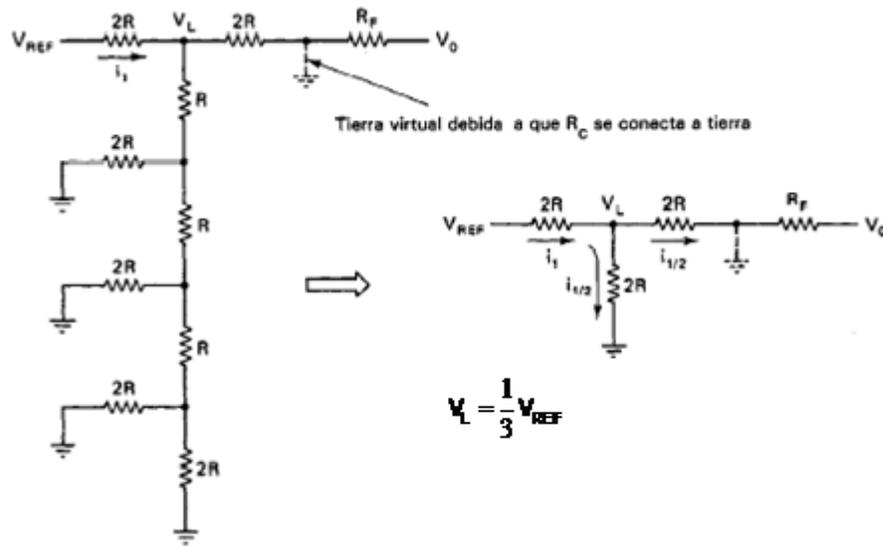


Figura 5-5 Convertidor digital a analógico de escalera R-2R.

Entonces se determina la corriente de salida cuando se aplica a cada una de esas entradas individuales. Por último, se suman todas las salidas para obtener la salida total.

Con este método, considérese una corriente que pasa en cualquiera de las entradas aisladas. Cuando la corriente alcanza un nodo, se divide en dos, porque en ambas ramas se tiene una resistencia de  $2R$ . Como resultado de ello, la corriente que entra a cualquier nodo se divide por igual al dejarlo. Esto se muestra en la figura 5-6 b). La corriente que pasa por la resistencia de realimentación  $R_F$  debida al bit menos significativo es  $\frac{1}{8}$  de la corriente debida al bit más significativo. Se pueden fabricar convertidores analógicos a digitales de 12 y de 16 bits con esta técnica. Sin embargo, la estabilidad de la fuente de poder y el ruido vienen a jugar un papel de primera importancia al aumentar el número de bits. La velocidad del convertidor está limitada por la velocidad de extinción del amplificador.

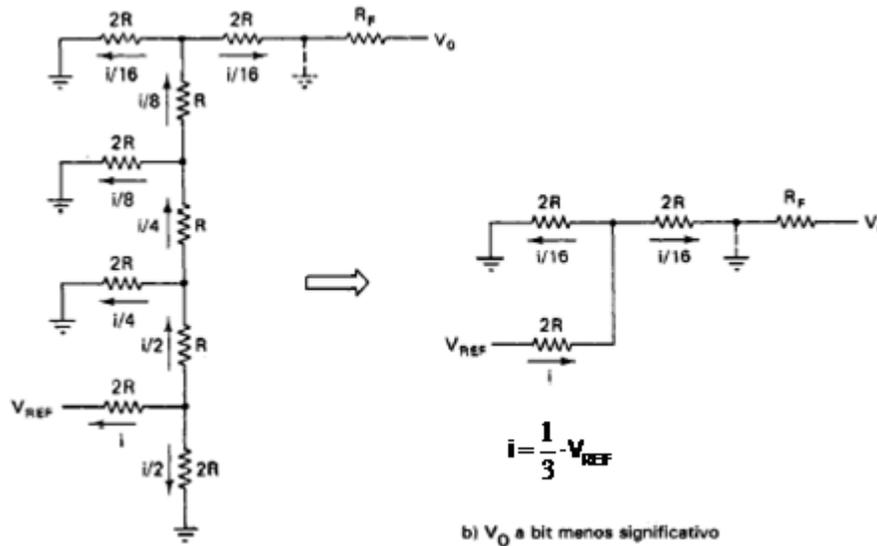


a)  $V_O$  debido a bit más significativo

$$V_L = \frac{1}{3} \cdot V_{REF}$$

$$i_1 = \frac{V_{REF} - V_L}{2R} = \frac{2/3 V_{REF}}{2R} = \frac{V_{REF}}{3R}$$

$$V_O = \left(\frac{i_1}{2}\right)(R_F) = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{REF}}{3R}\right) \cdot R_F = \frac{V_{REF} \cdot R_F}{6}$$



$$i = \frac{1}{3} \cdot V_{REF}$$

$$V_O = \frac{1}{16} \cdot R_F = \frac{V_{REF} R_F}{48}$$

$$\frac{V_{OMSB}}{V_{OLSB}} = \frac{V_{REF} \cdot R_F}{V_{REF} \cdot R_F} = 8 \quad (8)$$

### 2.2.2.2.3 Convertidores D/A multiplicadores.

Las redes sumadoras resistivas en escalera se usan específicamente en los *convertidores D/A tipo multiplicador*. Con estos convertidores, el voltaje de referencia ( $V_{REF}$ ) se puede variar por todo el rango de  $\pm V_{REF\_MAX}$  y la salida analógica es el producto del voltaje de referencia y la palabra digital de entrada. Es un método para construir un amplificador de ganancia controlada. Un método más versátil emplea un dispositivo de memoria como p. ej. una EPROM como tabla de consulta que convierte una entrada digital a salida digital que se aplica al convertidor R—2R. La relación entre las señales digitales de entrada y salida puede ser cualquier relación matemática sencilla o compleja. La raíz cuadrada en las mediciones de flujo sería un ejemplo.

### 2.2.2.2.3 Convertidores analógico-digital.

Se usan un gran número de métodos para convertir señales analógicas a la forma digital. Los que más se emplean en los circuitos convertidores A/D disponibles en el mercado son cinco:

- 1.- Rampa de escalera
- 2.- Aproximaciones sucesivas
- 3.- Doble rampa
- 4.- Voltaje a frecuencia
- 5.- Paralelo o instantáneo

<sup>8</sup>  $V_{OMSB}$  = Voltaje de salida, bit más significativo.  $V_{OLSB}$  = Voltaje de salida, bit menos significativo

### 2.2.2.3.1 Convertidores A/D de rampa de escalera.

Los convertidores más sencillos son de este tipo. En la figura 5-7 aparece un diagrama de bloques de su funcionamiento. Cuando se aplica un comando de inicio o arranque a la lógica de control, el voltaje analógico de entrada se compara con una salida de voltaje de un convertidor D/A. Esta salida comienza en cero y se incrementa en un bit menos significativo con cada pulso del reloj. Siempre que el voltaje de entrada  $V_{ent}$  sea mayor que el voltaje de salida del convertidor D/A, el comparador producirá una señal de salida que continúa permitiendo que los pulsos del reloj se alimenten al contador. Sin embargo, cuando el voltaje de salida de ese convertidor es mayor que el voltaje de entrada  $V_{ent}$ , la salida del comparador cambia y esta acción evita que los pulsos del reloj lleguen al contador. El estado del contador en ese instante representa el valor de voltaje de entrada en forma digital. La desventaja de este tipo de convertidores es que, no obstante su simplicidad, es bastante lento y el tiempo de conversión depende de la amplitud de voltaje de entrada.

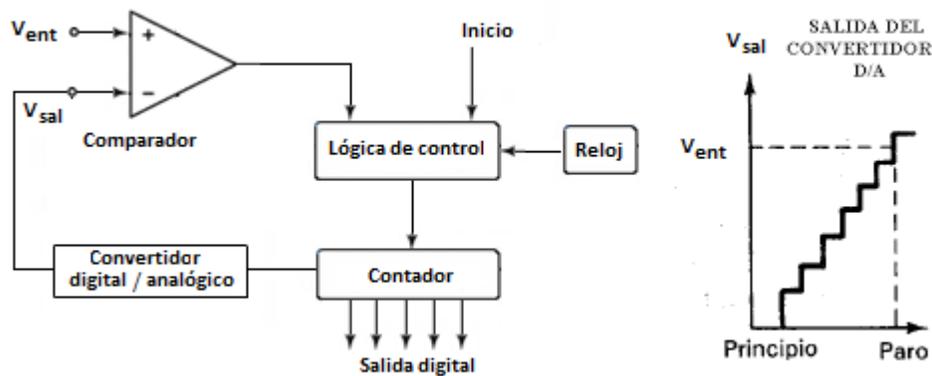


Figura 1-5. Diagrama de bloques del convertidor analógico a digital en rampa de escalera

### 2.2.2.3.2 Convertidores A/D de aproximaciones sucesivas.

Se utilizan ampliamente debido a su combinación de alta resolución y velocidad, ya que pueden efectuar conversiones entre 1 y 50  $\mu$ s. Sin embargo, son más caros. La lógica de este convertidor prueba varios códigos de salida y los alimenta al convertidor D/A y a un registro de almacenamiento y compara el resultado con el voltaje de entrada a través del comparador. La operación es análoga a la acción de pesar una muestra en una balanza de laboratorio con pesos estándar en una secuencia binaria. El procedimiento correcto es comenzar con el mayor peso estándar y proseguir en orden hasta el menor. La muestra se coloca en un platillo y el peso mayor se coloca en el otro; si la balanza no se inclina, se deja el peso, y se coloca el siguiente con menor peso. Si la balanza se inclina, se quita el peso mayor y se agrega el siguiente menos pesado. Se usa el mismo procedimiento para el siguiente valor menos pesado y así se prosigue hasta el menor. Después de que se ha probado el enésimo peso y se ha tomado una decisión, se dan por terminadas las mediciones de peso. El total de las pesas que se encuentran en el platillo es la aproximación más cercana al peso de la muestra. En el convertidor de aproximaciones sucesivas, se implementa el procedimiento de medición de pesos mediante un convertidor D/A, un comparador, un registro de almacenamiento y una lógica de control.

En la figura 5-8 se muestra un diagrama de bloques del convertidor de aproximaciones sucesivas. El diagrama se parece muchísimo al de la rampa de escalera, pero la diferencia estriba en la lógica especial del convertidor. En lugar de permitir que el voltaje de referencia del comparador (que proviene de la salida de un convertidor D/A) aumente desde cero pasando por todos los escalones hasta alcanzar a  $V_{ent}$ , la lógica de este convertidor prueba varios códigos de salida y los alimenta al convertidor D/A) y a un registro de almacenamiento y compara el resultado con  $V_{ent}$  a través del comparador.

La operación es análoga a la acción de pesar una muestra en una balanza de laboratorio con pesos estándar en una secuencia binaria, como  $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \dots, \frac{1}{n}$  kg. El procedimiento correcto es comenzar con el mayor peso estándar y proseguir en orden hasta el menor. La muestra se coloca en un platillo y el peso mayor se coloca en el otro; si la balanza no se inclina, se deja el peso, y se coloca el siguiente con menor peso. Si la balanza se inclina, se quita el peso **mayor** y se agrega el siguiente menos pesado. Se usa el mismo procedimiento para el siguiente valor menos pesado y así se prosigue hasta el menor. Después de que se ha probado el *n*ésimo peso y se ha tomado una decisión, se dan por terminadas las mediciones de peso. El total de las pesas que se encuentran en el platillo es la aproximación más cercana al peso de la muestra.

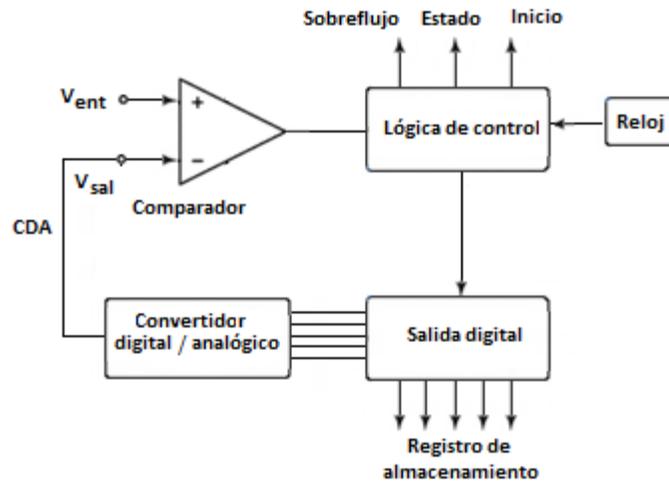


Figura 5-8. Diagrama de bloques de un convertidor analógico a digital de aproximaciones sucesivas.

En el convertidor de aproximaciones sucesivas, se implementa el procedimiento de medición de pesos mediante un convertidor D/A, un comparador, un registro de almacenamiento y una lógica de control, las entradas del convertidor D/A se ajustan a "0" al comenzar. La lógica de control lleva al dígito más significativo del convertidor a "1" y el comparador prueba la salida resultante del convertidor contra la entrada analógica. El comparador llega a una decisión acerca de si almacenar el bit "1" en el registro correspondiente o almacenar un "0". A continuación el segundo bit del convertidor se lleva a 1 y se hace una segunda decisión. Después de  $n$  bits, el registro de almacenamiento contiene todos aquellos bits que se almacenaron como "1" o como "0" y el contenido total será una aproximación digital del voltaje de la señal analógica de entrada. La figura 5-9 muestra el diagrama de sincronización de un convertidor de aproximaciones sucesivas al llevar a cabo su exploración.

El tiempo de conversión en los convertidores de aproximaciones sucesivas es constante y lo da la ecuación  $T_{convert} = n/f$ , siendo  $n$  el número de bits en el convertidor y  $f$  la frecuencia del reloj. Así, un convertidor con reloj de 12 MHz puede completar una conversión cada microsegundo. Los convertidores más comunes de 10 y 12 bits tienen tiempos de conversión entre 4 y 30  $\mu s$  y su precio es moderado.

Sin embargo, un requisito muy importante de estos convertidores es que el voltaje de entrada permanezca constante durante el tiempo de conversión. Si no lo es, pueden surgir errores durante los periodos de prueba y la salida puede ser muy inexacta. En el capítulo 17 se presenta una descripción del uso de circuito de muestreo y retención para introducir y mantener constante el voltaje que se está convirtiendo en el convertidor.

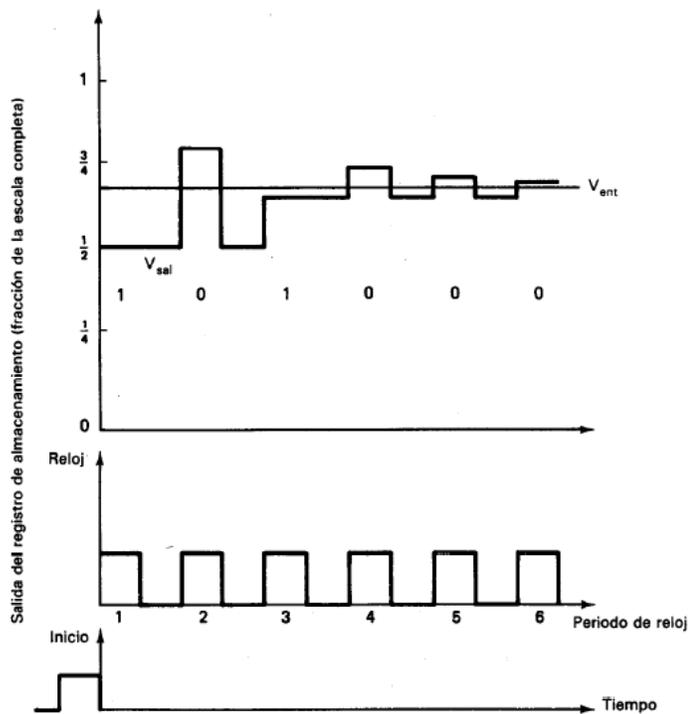


Figura 5-9 Diagramas de sincronización de una búsqueda de aproximaciones sucesivas en un convertidor de 6 bits.

### 2.2.2.3.3 Convertidores A/D de doble rampa.

Se emplean ampliamente en aplicaciones en donde la mayor importancia estriba en la inmunidad al ruido, gran exactitud y economía. Los convertidores de doble rampa pueden suprimir la mayor parte del ruido de la señal de entrada debido a que emplean un integrador para efectuar la conversión. El rechazo del ruido puede ser infinito para una frecuencia específica del ruido si el primer periodo de integración del convertidor ( $T_1$  mostrado en la figura 5-10) se iguala al periodo del ruido. Por lo tanto, para rechazar el ruido prevaleciente debido a las líneas de alimentación de 60 Hz, se necesita que  $T_1$  sea de 16.667 ms. Sin embargo, esta ventaja también conduce a tiempos de conversión muy largos (típicamente de 10 a 50ms). Sin embargo las ventajas de los convertidores de doble rampa los hacen muy adecuados para aplicaciones en las que no sean necesarios tiempos breves de conversión. Se emplean mucho, en especial en aplicaciones de instrumentos de precisión tales como voltímetros digitales.

El voltaje de corriente directa que se va a convertir,  $V_{ent}$ , se alimenta a un integrador, que produce una salida en forma de rampa. La señal de rampa comienza en cero y aumenta para un intervalo fijo de tiempo,  $T_1$ , igual a la cuenta máxima del contador multiplicada por la frecuencia del reloj. Un contador de 8 bits operando 1 MHz tendría un  $T_1$  de 8  $\mu$ s. La pendiente de la rampa es proporcional a la magnitud de  $V_{ent}$ . Al término del intervalo  $T_1$ , el bit de transferencia del contador de fluctuaciones hace que el interruptor se mueva a la posición  $-V_{REF}$ . En esa posición, una fuente de corriente constante ( $-V_{REF}/R$ ) comienza a descargar el capacitor  $C$ . El contador de fluctuaciones se restablece a cero cuando se tiene un bit de transferencia. El conteo continúa hasta que el interruptor detector de cruce de cero conmuta el estado como resultado de haberse descargado  $C$ . Se detiene el contador por el detector y la cuenta resultante es proporcional al voltaje de entrada. En la siguiente deducción es importante observar que  $t_r$ , es independiente de los valores de  $R$  y de  $C$ .

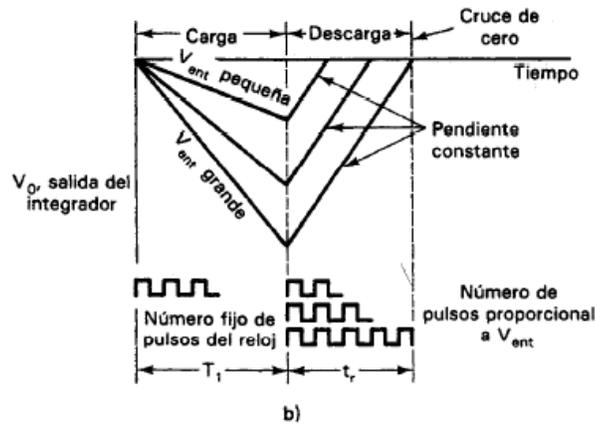
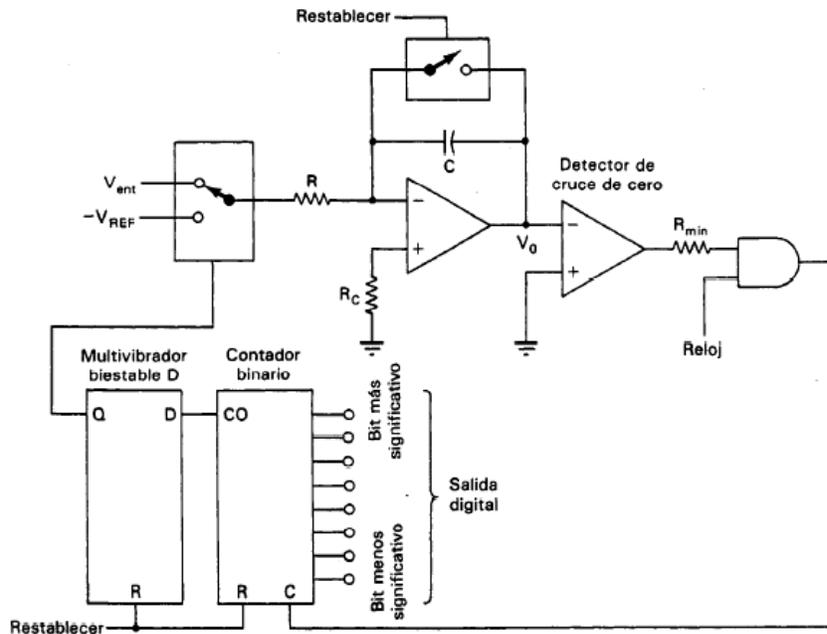


Figura 1-7. Convertidor analógico a digital de doble rampa.

$$Q_{\text{CARGANDO}} = Q_{\text{DESCARGANDO}}$$

$$\frac{i T_1}{C} = \frac{i t_r}{C}$$

$$\frac{V_{\text{ent}}}{R} T_1 = \frac{V_{\text{REF}}}{R} t_r$$

$$V_{\text{ent}} = V_{\text{REF}} \frac{t_r}{T_1}$$

#### 2.2.2.3.4 Convertidor de voltaje a frecuencia.

En este tipo de convertidores, el voltaje de CD de entrada se convierte en un conjunto de pulsos cuya velocidad de repetición (o frecuencia) es proporcional a la magnitud del voltaje de alimentación (figura 5-11). Los pulsos se cuentan mediante un contador electrónico en forma semejante al de contar las longitudes de onda con el contador de intervalo de tiempo en el voltímetro digital de doble rampa. Por lo tanto, la cuenta es proporcional a la magnitud del voltaje de entrada. Como el ruido aleatorio (modo normal) tiende a un valor promedio de cero, este tipo de voltímetro digital puede rechazar el ruido de c.a. Esto es, su valor indicado es igual al valor promedio medido durante

un intervalo específico de tiempo. Esta posibilidad de rechazo de ruido es la ventaja principal de este tipo de convertidores.

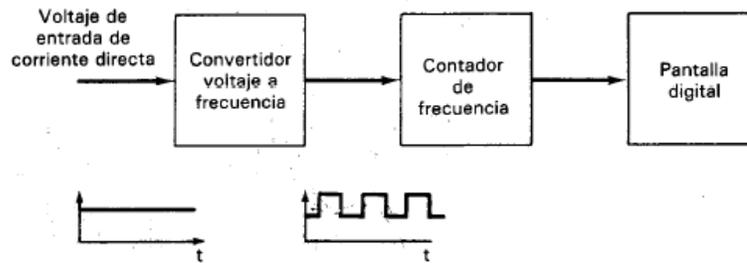


Figura 1-8. Diagrama de bloques de un multímetro digital tipo integrador voltaje a frecuencia.

La parte primordial de esos convertidores es el circuito que transforma el voltaje de CD de entrada a un conjunto de pulsos. Se emplea un integrador para llevar a cabo esta tarea. Las frecuencias típicas del convertidor de voltaje a frecuencia (V/F) quedan en el rango de 10 kHz a 1 kHz. El convertidor muy utilizado de 10 kHz necesita un intervalo de compuerta de 0.025 s para una conversión A/D de 8 bits.

La parte primordial de esos convertidores es el circuito que transforma el voltaje de cd de entrada a un conjunto de pulsos. Se emplea un *integrador* para llevar a cabo esta tarea. Esto es, el voltaje de cd de entrada se integra y la carga se almacena en un capacitor. Cuando el voltaje en el capacitor es mayor que el voltaje de referencia aplicado a un comparador, se usa el comparador para descargar el capacitor integrador a cero y al mismo tiempo disparar un generador de pulsos para emitir un pulso de ancho constante. El pulso se alimenta al contador de frecuencia. Como el voltaje de entrada al integrador todavía está presente, se reinicia el proceso. La pendiente de la curva de integración depende de la magnitud de la señal de entrada. Por lo tanto, el número de pulsos producidos por segundo es directamente proporcional a la amplitud del voltaje de señal a la entrada.

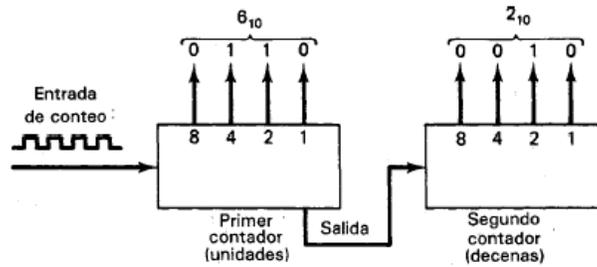
Las frecuencias típicas del convertidor de voltaje a frecuencia (V/F) quedan en el rango de 10 kHz a 1 MHz. El convertidor muy utilizado de 10 kHz necesita un intervalo de compuerta de 0.025 s para una conversión A/D de 8 bits. Como los convertidores de voltaje a frecuencia son baratos y su exactitud es moderada y son resistentes al ruido, son seleccionados con mucha frecuencia para utilizarse en medidores de tablero de tres dígitos.

#### 2.2.2.2.4 Conteo y codificación digital.

La salida de los dos convertidores A/D más empleados en medidores digitales (de doble rampa y de voltaje a frecuencia) es una cadena de pulsos. Los pulsos se cuentan durante un intervalo de tiempo predeterminado mediante un contador digital decimal codificado binario (BCD) y la cuenta resultante representa el valor de la lectura de la señal de entrada en forma digital. El contenido del contador se pone a disposición como una salida digital en paralelo que se puede transmitir a otros dispositivos de almacenamiento digital o se puede decodificar para activar un mecanismo de despliegue o presentación. A continuación se describen con mayor detalle el procedimiento de conteo-decodificación-despliegue.

El contador decimal codificado binario (BCD) consiste de un grupo de 4 contadores binarios cada uno de 4 bits, que sólo cuenta desde  $0000_2$  hasta  $1001_2$ , permitiendo así que los contenidos de cada uno de los contadores de 4 bits asuman sólo 10 estados diferentes. Nótese que un *contador binario* es un circuito digital que cuenta pulsos digitales. Su contenido se avanza en una cuenta cada vez que aparece un pulso válido en su entrada. Si un codificador decimal codificado binario de 4 bits, recibe un pulso cuando está en su estado  $1001_2$ , el pulso regresará (restablecerá) el contador al estado  $0000_2$  y también hará que emita un pulso de salida. Si hay un segundo contador de 4 bits conectado al primero en cascada, el pulso de salida del primer contador avanzará los contenidos del segundo en una cuenta. Los 10 estados de cada contador de 4 bits pueden representar a los dígitos decimales de 0 a 9. Por ejemplo, en el número decimal 26, el dos estaría representado cuando el contenido del segundo contador de 4 bits estuviera en el estado  $0010$ , mientras que el seis estaría representado cuando el contenido del primer contador estuviera en el estado  $0110$ . El contenido de cada uno de los contadores de 4 bits está disponible como una señal digital de 4 bits en

paralelo a través de las líneas de señal 8-4-2-1 de cada contador, como se muestra en la figura 5.13. Para dar una lectura decimal del conteo acumulado, en este contador decimal codificado binario, se necesita un registro de datos con cerrojo, un decodificador y una pantalla decimal.



**Figura 5-13** Contador decimal codificado binario de dos decimales, mostrando un conteo de 26.

Cuando el contador BCD ha completado el conteo que representa una sola lectura, su contenido es transferido a *un registro con cerrojo de datos*. Este registro de cerrojo es un dispositivo digital que está diseñado para “mantener” un conjunto de señales digitales aun cuando cambien las entradas a él. Sin embargo, cuando el registro con cerrojo recibe un comando de *habilitar*, las señales presentes en su entrada (que en este caso son transferidas al registro de cerrojo) representan los contenidos del contador BCD. Cuando se suspende el comando de habilitar, el contenido del registro de cerrojo permanece fijo hasta que se recibe otro comando de habilitar. Las salidas del registro con cerrojo se alimentan entonces a un *decodificador*. Este decodificador convierte la representación BCD a señales adecuadas para activar a los dispositivos de despliegue (pantallas). La mayor parte de los dispositivos modernos de este tipo son diodos emisores de luz (LED, iniciales de Light Emitting Diode) de siete segmentos, o pantallas de cristal líquido (LCD, iniciales de Liquid Crystal Display). El decodificador efectúa la función de convertir las señales BCD en señales que iluminan los segmentos adecuados de la pantalla. Cuando se emplea una PROM como decodificador, se puede crear cualquier relación deseada entre la entrada y la salida. Una señal analógica de entrada de 1.5 volts podría representar temperatura, velocidad, flujo o cualquier otra variable de un proceso. La PROM puede cambiar la señal digital del convertidor a grados Celsius, kilómetros por hora, litros por hora, u otras unidades deseadas, basadas en la relación entre la señal analógica de entrada y una salida amigable al usuario. Por ejemplo, se tiene el cambio de unidades inglesas a métricas en un tablero de instrumentos de un automóvil cuando sólo se cuenta con una señal analógica. En la figura 5-14, las salidas del decodificador activan los segmentos del despliegue para representar el dígito decimal 6. (La identificación normal de los segmentos es de la *a* a la *g*, como también se muestra en la figura 5-14.) Para mostrar o desplegar el “6”, se iluminan los segmentos *a*, *c*, *d*, *e*, *f* y *g*, mientras que *b* permanece a oscuras.

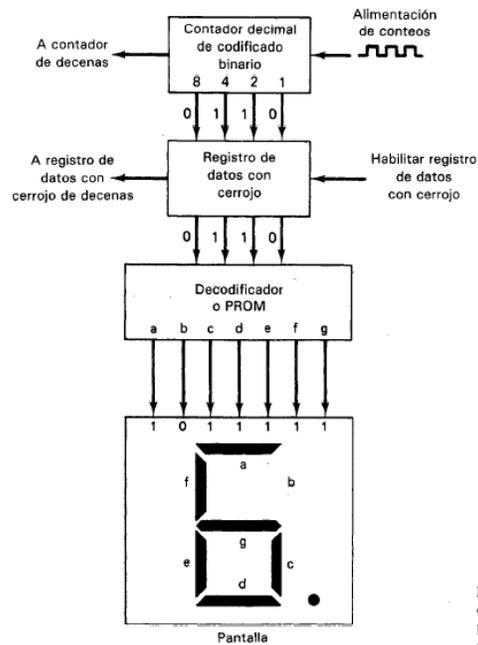
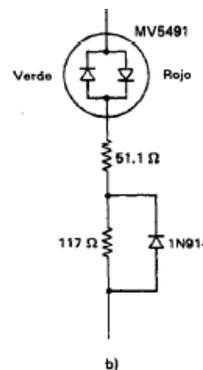
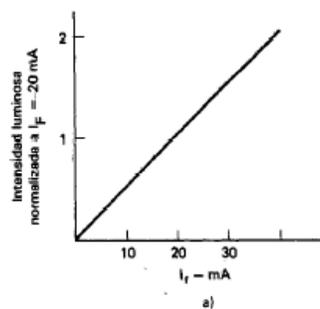


Figura 5-14 Contador, registro de datos con cerrojo, decodificador y pantalla para un conteo de una sola década.

### 2.2.2.2.5 Dispositivos de despliegue.

Los dispositivos que se emplean con más frecuencia en las salidas digitales son las pantallas de siete segmentos con diodos emisores de luz o con cristal líquido. Antes de que se generalizara el empleo de los diodos y de los cristales líquidos, se usaban ampliamente las lámparas miniatura de neón y las incandescentes. El tubo Nixie (de neón), producto Burroughs y el tubo Numitron (incandescente), producto RCA, son dos ejemplos. Muchos instrumentos todavía emplean pantallas con esos dispositivos.

Los diodos emisores de luz se fabrican con materiales semiconductores de formulación especial (de arseniuro de galio de fosfuro de galio) que emiten luz cuando el transistor conduce. Se consiguen LED en color rojo, verde, naranja, amarillo y doble rojo-verde, figura 5.15 b). La intensidad de luz tiene dependencia lineal con la corriente de excitación. Como los LED se especifican para distintas corrientes de excitación, una corriente demasiado intensa acortará mucho la vida de ellos y cada uno debe tener en serie una resistencia limitadora de corriente. Las corrientes de excitación típicas van de 10 a 50 mA. Hay una amplia variedad de configuraciones disponibles para que el ingeniero pueda crear pantallas con diodos emisores de luz. En la figura 5-15 se muestran los tipos más generales.



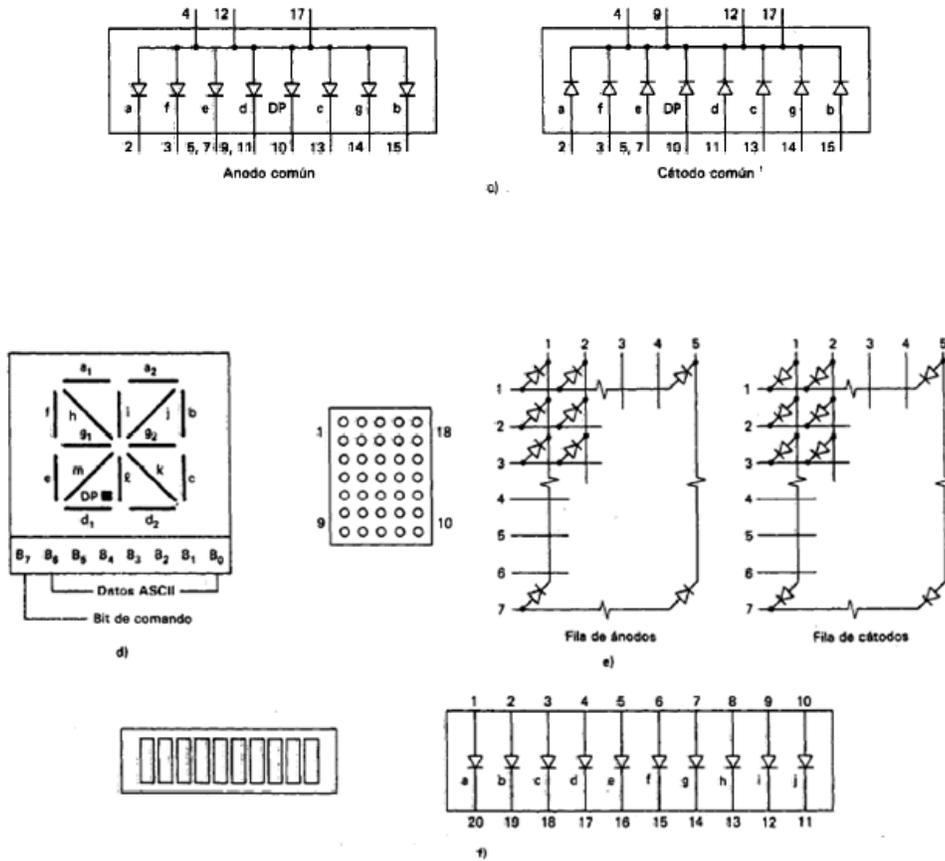


Figura 5-15 Pantallas de diodos emisores de luz (LED). a) Características del LED b) lámpara de doble LED con intensidades igualadas; c) arreglo de las puntas de la pantalla típica de siete segmentos; d) sistema de pantalla alfanumérica de 14 segmentos; e) pantalla alfanumérica de matriz de puntos 5 x 7; f) arreglo de gráfico de barras de 10 segmentos.

El error más común al emplear esas pantallas es no tomar en cuenta la polaridad de los diodos. Hay tres configuraciones comunes: de ánodo común, de cátodo común y de diodos individuales como las gráficas de barras. Sin embargo, las pantallas con diodos emisores no se prestan por lo común para instrumentos portátiles diseñados para emplearse en ambientes luminosos (como al aire libre en un día soleado) porque por lo general dan un contraste insuficiente para una observación clara del resultado.

Por otro lado, las pantallas de cristal líquido dan una presentación que se puede observar con facilidad en medios luminosos, pero no se puede ver en medios poco iluminados u oscuros. Por lo tanto, en condiciones de baja iluminación, las pantallas se deben iluminar por detrás (como p. ej., el tablero de instrumentos del automóvil).

El material de la pantalla consiste de una alta concentración de moléculas asimétricas en un solvente orgánico transparente. Esta combinación de sustancias químicas cambia de color y de transparencia cuando se le aplica un campo eléctrico. La aplicación de un voltaje de c.d. acorta la vida de la pantalla. Se aplica entonces una onda cuadrada al plano trasero y a través de un elemento de la pantalla. Generalmente, se emplea una señal de 5 volts y 100 Hz; sin embargo, se deben seguir las recomendaciones del fabricante. Cuando la señal que se aplica al elemento de la pantalla y el plano trasero están fuera de fase (controlada con una compuerta exclusiva) la luz no pasa a través de la pantalla. Se pueden crear pantallas muy coloridas e informativas empleando plástico e iluminación de colores. Los dispositivos sólo toman corriente cuando el material del cristal cambia de estado, y una vez que el número se forma, sólo emplea una corriente de fuga muy pequeña (de microamperes). Así, las pantallas de cristal líquido encuentran empleo en aplicaciones donde es importante un bajo consumo de potencia. Sin embargo, las pantallas de cristal líquido responden mucho más lento que los diodos emisores de luz, y esto constituye una desventaja para algunas aplicaciones.

El tubo Nixie es un dispositivo de descarga en gas neón. Hay 10 cátodos y un solo ánodo en un solo tubo de neón. Los cátodos tienen la forma de los dígitos del 0 al 9 utilizan alambres delgados. Cuando uno de los cátodos se conecta a tierra, los átomos de neón en la vecindad de la superficie de ese cátodo se ionizan y emiten luz con la forma del cátodo. También el tubo Nixie necesita de un decodificador para que se pueda usar el contenido del contador BCD para seleccionar el cátodo correcto.

El dispositivo Numitron emplea un arreglo de siete segmentos de filamentos incandescentes semejantes al que se emplea con los diodos emisores y las pantallas de cristal líquido. Su mayor desventaja es que consumen mucha más potencia que una pantalla equivalente con LED.

### **2.2.2.3 Voltímetros digitales.**

Los voltímetros digitales emplean convertidores A/D y contadores BCD para convertir las señales de voltaje de entrada a palabras digitales codificadas en binario que se emplean para activar los dispositivos digitales de despliegue. En la figura 1-8 se mostró un diagrama de bloques para el voltímetro digital. Como las señales analógicas a los convertidores A/D deben ser de corriente directa (o con variación muy lenta), los voltajes de entrada que miden los voltímetros digitales deben ser ya sea voltajes de corriente directa o voltajes de corriente alterna pasados a una forma equivalente (valor promedio, rms o pico de c.d.).

Los voltímetros digitales más sencillos y menos costosos tienen la menor resolución (expresada como el número de dígitos en la pantalla) y emplean convertidores integradores de voltaje a frecuencia para efectuar sus conversiones digitales. El medidor de tablero común con pantalla digital de 3½ dígitos es el ejemplo principal de instrumento de bajo precio. Los modelos de voltímetros digitales algo más sofisticados están diseñados generalmente con convertidores A/D integradores de doble rampa. Esos convertidores, aunque relativamente lentos, puede dar una excelente resolución, alta resistencia al ruido y precio moderado. Para la mayoría de las aplicaciones puede considerarse como adecuado un convertidor A/D de doble rampa que realice de 15 a 30 conversiones por segundo. Los voltímetros para aplicaciones especiales, en los cuales se necesitan un gran número de lecturas por segundo, emplean convertidores A/D de aproximaciones sucesivas. Se pueden lograr hasta 1000 lecturas por segundo con algunos modelos.

#### **2.2.2.3.1 Interpretación de las Especificaciones de Exactitud de los Voltímetros Digitales.**

Las exactitudes de los voltímetros digitales son generalmente mayores que las de los medidores analógicos, pero se deben comprender en forma clara las especificaciones de los fabricantes. Hay tres conceptos clave involucrados en la comprensión de las especificaciones de exactitud de los voltímetros digitales: *la resolución, el error constante y el error proporcional.*

La *resolución* de un voltímetro digital indica el número de dígitos en la pantalla. Los errores constantes son todos los errores que permanecen constantes a través de todo el rango del instrumento. Esos errores se expresan en términos del número de dígitos o del porcentaje de la lectura de escala completa (o rango). Los *errores proporcionales* son aquellos que son proporcionales a la magnitud de la indicación digital. Así, los errores proporcionales se expresan en términos de porcentaje de la lectura. La mayoría de los fabricantes especifican la exactitud de un voltímetro digital en términos de una combinación de errores constantes y proporcionales. Por ejemplo, se puede expresar la exactitud de un voltímetro digital mediante combinaciones como “ $\pm 0.01$  por ciento de la lectura  $\pm 0.01$  por ciento del rango”; o bien como “ $\pm 0.05$  por ciento de la lectura  $\pm 1$  dígito”. Por ejemplo, si se miden 5.000 volts con un medidor de cuatro dígitos cuya exactitud sea “0.01 por ciento de la lectura + 1 dígito”, el error máximo será de 0.01 por ciento de 5 V + 0.001 V, o sea 0.0015 V en total. Es importante la resolución de un voltímetro digital debido a que debe ser mayor que la exactitud del medidor. Por ejemplo, se necesita un instrumento que tenga una resolución de cinco dígitos para permitir mediciones con exactitud de 0.01 por ciento en el 90 por ciento del rango dinámico total del medidor. Sin embargo, no se puede suponer de inmediato que un voltímetro digital con pantalla de seis dígitos tenga mayor exactitud que uno de sólo cinco dígitos (aun cuando su resolución sea mayor). Se deben examinar las especificaciones de ambos instrumentos antes de conocer con certeza la exactitud de cada uno.

Para mediciones de voltajes de c.d., la exactitud de los voltímetros digitales va desde 0.1 hasta 0.001 por ciento de la lectura  $\pm 1$  dígito. Si el instrumento puede medir también voltajes de c.a., resistencia y corrientes, la exactitud con la que mide el instrumento es generalmente distinta (y menos exacta) que la exactitud para voltaje de c.d. En la sección que trata de los voltímetros digitales tipo multímetro se presentan exactitudes específicas para ellos.

Se debe incluir una nota final sobre el empleo de los términos de condiciones de *referencia* y *capacidad nominal*. Las condiciones de *referencia* (o de corto plazo) son condiciones ideales de laboratorio, y las especificaciones a esas condiciones representan la mejor exactitud asequible con el instrumento. Las especificaciones enlistadas bajo condiciones de *capacidad nominal* toman en cuenta la degradación de la exactitud como resultado de factores tales como temperatura, envejecimiento de componentes y humedad.

### 2.2.2.3.2 Particularidades y Especificaciones Adicionales de los Voltímetros Digitales.

1. *Impedancia de entrada.* Los voltímetros digitales pueden cargar los circuitos que miden, como cualquier otro voltímetro. Como la exactitud inherente de un voltímetro digital se puede hacer tan grande, es importante que esos efectos de carga no originen un error mayor que las incertidumbres debidas sólo al propio medidor. Las impedancias de entrada de los voltímetros digitales son por lo común bastante altas (10 M $\Omega$ ) a 10 G $\Omega$ ), y no deben, en sí, introducir una carga seria. Sin embargo, se presenta la siguiente guía para permitir determinar si un voltímetro digital originará errores de carga mayores que los errores causados por sus inexactitudes inherentes: *El voltímetro digital debe tener una impedancia de entrada que supere a la impedancia de la fuente que se mide en al menos un factor de  $10^n$  donde n es el número de dígitos en la pantalla.* Así, si el número de dígitos en la pantalla de un medidor es 5 y tiene una impedancia de entrada de 1 G $\Omega$  (10<sup>9</sup>  $\Omega$ ), la impedancia máxima a través de la cual el voltímetro digital puede medir sin causar errores de carga demasiado grandes es 10 k $\Omega$ .

2. *Rapidez de lectura.* En la mayoría de las aplicaciones de laboratorio, una velocidad de una lectura por segundo es satisfactoria. Sin embargo, hay algunos casos donde se necesitan velocidades mayores. Algunos voltímetros digitales pueden tomar hasta 500 lecturas por segundo con resolución de 6½ dígitos y una exactitud de 5 ppm con sensibilidad de 10 nV (si se emplea un dispositivo externo de registro con el voltímetro).

3. *Selección de rango.* Los voltímetros digitales pueden tener selección de rango automática o manual. La particularidad de la selección automática de rango puede ser útil cuando se deben efectuar un gran número de mediciones con un rango amplio de voltajes aleatorios.

4. *Sobrecapacidad.* La sobrecapacidad o sobrerango permite que un voltímetro digital mida valores superiores a los puntos normales de transferencia de la década sin necesidad de cambiar los rangos. Esto permite al medidor mantener la misma resolución para valores cercanos a los puntos de transferencia de la década (1 V, 10 V, 100 V). El límite hasta el cual es posible extender el rango se expresa en términos del porcentaje del rango o de la escala completa. Dependiendo del modelo del voltímetro digital, se pueden encontrar sobrecargas desde el 5 hasta el 300 por ciento.

5. *Eliminación de ruido en modo normal.* El ruido en modo normal es el tipo de ruido que aparece superpuesto en el lado alto de la señal de entrada (en forma de ondas o puntas). Para eliminar este ruido, que evita que el voltímetro determine correctamente el nivel verdadero de la c.d., se debe emplear un método para eliminar o promediar el ruido. En los voltímetros digitales integradores se elimina este ruido promediando la señal. En los demás tipos de voltímetros se emplea un filtro para quitar la mayor cantidad de ruido posible. El filtrado no necesita degradar la exactitud del voltímetro, pero baja la rapidez de medición. La capacidad de un voltímetro digital para rechazar el ruido en modo normal se especifica mediante una cantidad llamada el NMR (rechazo en modo normal) y se expresa en términos de decibeles a una frecuencia específica (p. ej., 30 dB a 60 Hz).

6. *Rechazo en modo común.* Las señales en modo común son aquellas que aparecen simultáneamente en las terminales alta y baja. Se originan en las corrientes del circuito a tierra donde se conecta el voltímetro digital. Estas señales en modo común pueden constituir un problema serio en algunas mediciones. Se emplean técnicas de *resguardo* para rechazar las señales en modo común. Estas técnicas consisten en rodear por completo los circuitos de medición y las puntas de prueba del voltímetro con una pantalla metálica que está aislada del circuito de medición.

Esta pantalla se conecta a una fuente adicional de voltaje que da un nivel cuyo valor es equivalente al del voltaje que se mide en las puntas de prueba. Como el resguardo y las puntas de entrada están conectados a puntos de potencial equivalente, no hay diferencia de potencial entre las terminales de entrada y la pantalla de resguardo. Esto evita que se acoplen corrientes de circuito a tierra con señales de interferencia en el circuito de medición; en lugar de ello, las corrientes del circuito a tierra pasan sin hacer daño a través de la pantalla a la tierra. (Consúltense el capítulo 16 para mayor información sobre circuitos a tierra y resguardo de entrada.)

## 2.3. FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN Y APLICACIÓN DE OTROS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.

### 2.3.1. Osciloscopio analógico.

El osciloscopio es un instrumento de prueba preciso y versátil.<sup>9</sup> Puede usarse para medir y observar formas de ondas sinusoidales<sup>10</sup> y no sinusoidales. Son aplicaciones comunes de él las mediciones de voltaje, período, frecuencia y fase (figura 1). Puede observarse sobre su pantalla la distorsión y las inadecuadas relaciones de sincronización de señales eléctricas. Por medio de él pueden ser comprobadas y medidas las características de señales moduladas.<sup>11</sup>

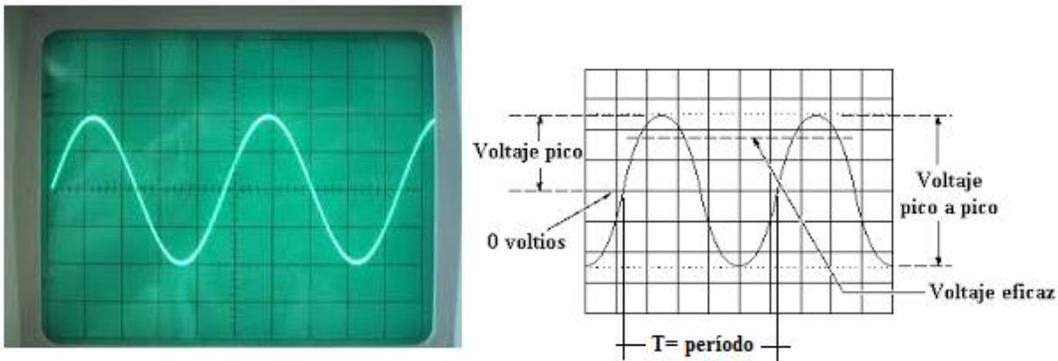


Figura 1. Visualización de una señal en un osciloscopio

#### 2.3.1.1 Descripción de las partes fundamentales de un osciloscopio.

Según se puede apreciar en el diagrama a bloques de la figura 2, las partes principales de todo osciloscopio son: el tubo de rayos catódicos, la sección de entrada para la señal vertical (formada por atenuadores y amplificadores), el circuito de sincronización y la sección vertical que produce la señal de barrido (o la base de tiempo).

<sup>9</sup> Adaptable a muchas cosas o que tiene varias aplicaciones

<sup>10</sup> Onda plana cuya magnitud sigue la ley trigonométrica del seno de una variable.

<sup>11</sup> La modulación es una técnica usada en telecomunicaciones que consiste en hacer variar alguna característica de una señal sinusoidal de forma que cambie de acuerdo con las variaciones de nivel de la señal moduladora, que es la información que se va a transmitir.

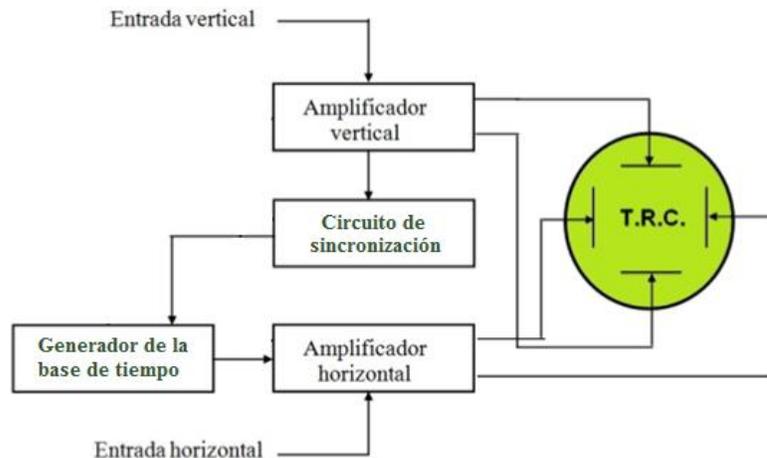
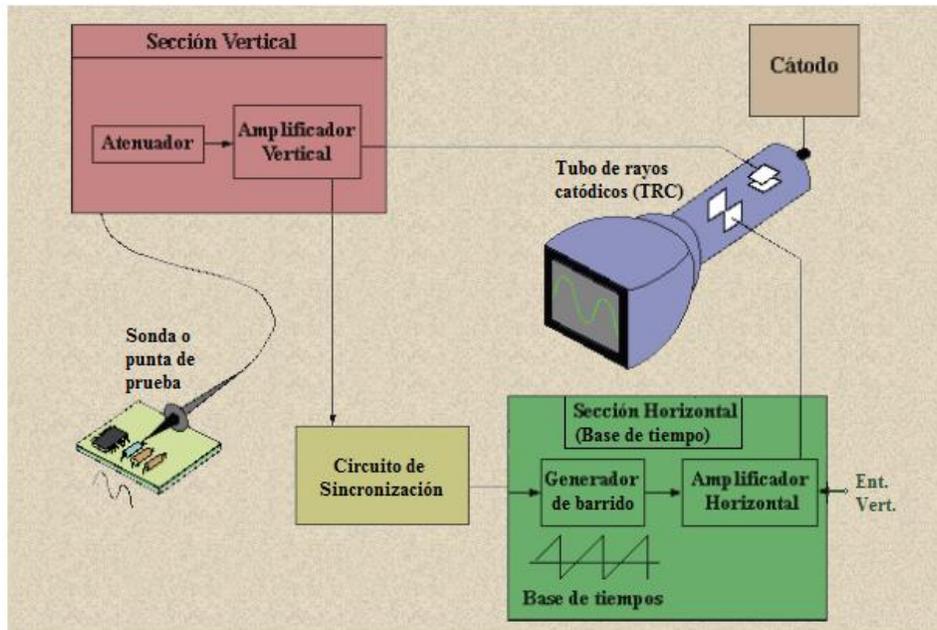


Diagrama de bloques genérico de un Osciloscopio

Figura 2.

La primera parte del osciloscopio es el tubo de rayos catódicos (TRC). Su principal función es permitir la visualización de la señal que se está estudiando, utiliza para ello sustancias fosforescentes o fluorescentes que proporcionan una luz normalmente verde.

Otra de las partes del osciloscopio es el generador de la base de tiempo. La función de este circuito es conseguir que la señal aplicada a las placas de deflexión horizontal aparezca en la pantalla como una función del tiempo. Se puede considerar que el sistema de coordenadas de la pantalla está formado por el eje vertical o eje  $Y$  y el eje horizontal o eje  $X$ , siendo en este último donde se suelen representar la magnitud *tiempo*. El circuito generador de base de tiempo debe conseguir que el punto luminoso en la pantalla se desplace periódicamente y con una velocidad constante en el eje horizontal de izquierda a derecha, volviendo luego rápidamente a la posición original y repitiendo todo el proceso a una frecuencia seleccionada.

El Amplificador Horizontal tiene como cometido amplificar previamente las señales que entren a las placas de deflexión horizontal, eje ( $X$ ). Normalmente se emplea para amplificar las señales que son enviadas por el circuito generador de base de tiempo. A dichas señales se les proporciona una amplitud suficiente para que se pueda producir

el desvío del haz de electrones a lo ancho de toda la pantalla. No solo se debe amplificar la señal de la base de tiempo sino que se puede amplificar cualquier otra señal externa aplicada a la entrada del amplificador horizontal.

El Amplificador Vertical es, como su nombre lo indica, el encargado de amplificar la señal que entre por la entrada vertical (Y). El osciloscopio debe ser capaz de analizar señales cuyos valores estén comprendidos en un rango lo mayor posible. Normalmente, los amplificadores verticales constan de dos partes: Amplificador y atenuador. El amplificador es el encargado de aumentar el valor de la señal. También es el encargado de que el ancho de la banda de paso sea lo mayor posible, y pueden aumentar tanto la banda de bajas como de altas frecuencias. El atenuador permite reducir el nivel de señales de entrada vertical muy elevadas.

El circuito de sincronía es el encargado de que la imagen que se ve en el tubo de rayos catódicos sea estable (o fija). Para poder conseguir esto se genera la señal de barrido de igual o múltiplo de frecuencia de la señal de entrada (vertical). Para sincronizar la señal vertical con la base de tiempo (o señal horizontal) se puede utilizar la denominada sincronización interna. Consiste en inyectar en el circuito generador de base de tiempo una tensión o pulso que se produce con la información del amplificador vertical. Así se consigue que el principio de la oscilación de la base de tiempo coincida con el inicio del ciclo de la señal de entrada. Existen otros tipos de sincronización como la sincronización externa o por medio de la red de alimentación de c.a.

### 2.3.1.1.1 El tubo de rayos catódicos (TRC).

La construcción del TRC del tipo de deflexión electrostática se muestra en la figura 3. Este sistema se construye en un encapsulamiento de vidrio al vacío, debido a que el aire contiene oxígeno y puede producir combustión haciendo que el filamento y el cátodo se incendien, con lo cual se provoca su destrucción.

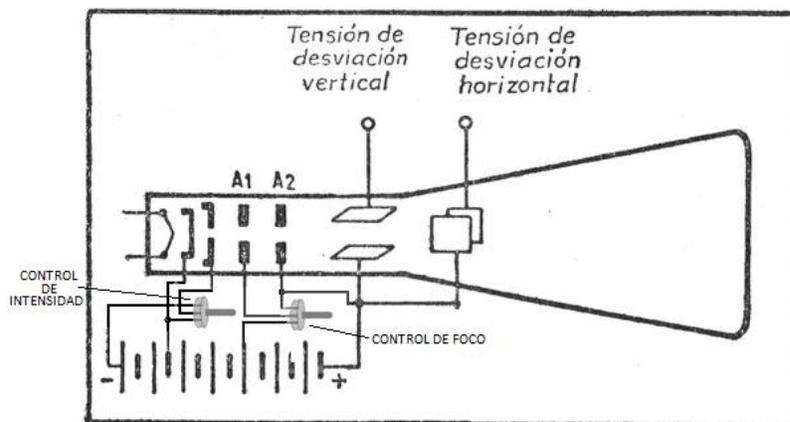
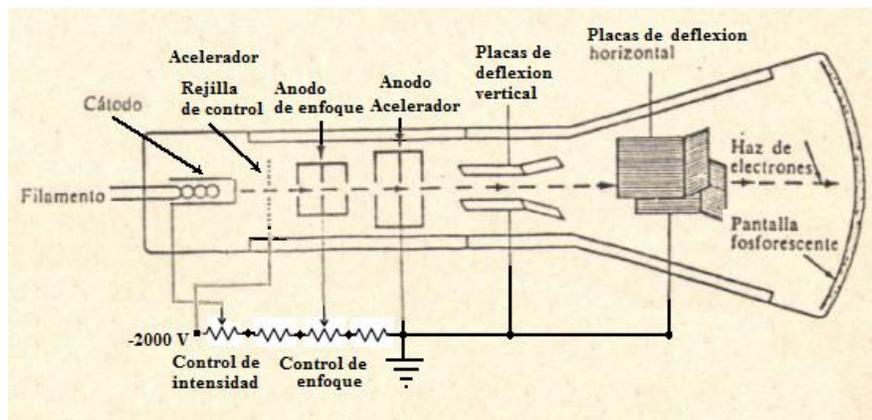


Figura 3. Tubo de rayos catódicos (TRC) común

En este diagrama de la figura 2 se ve que el TRC consiste de los siguientes bloques:

1) Liberación de electrones. Para extraer los electrones de un material los que conformaran el haz de rayos catódicos se tienen dos elementos: el calefactor y el cátodo calentado indirectamente. Su principio de funcionamiento se basa en el efecto termoiónico el cual dice que la acción del calor hace que los electrones de la capa externa de los átomos del cátodo, puedan adquirir suficiente energía cinética que les permite escapar del metal.

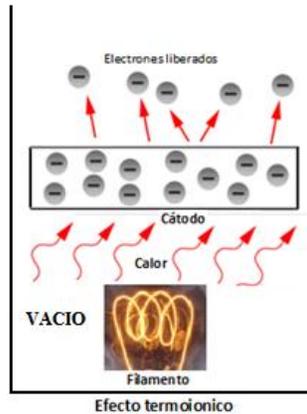


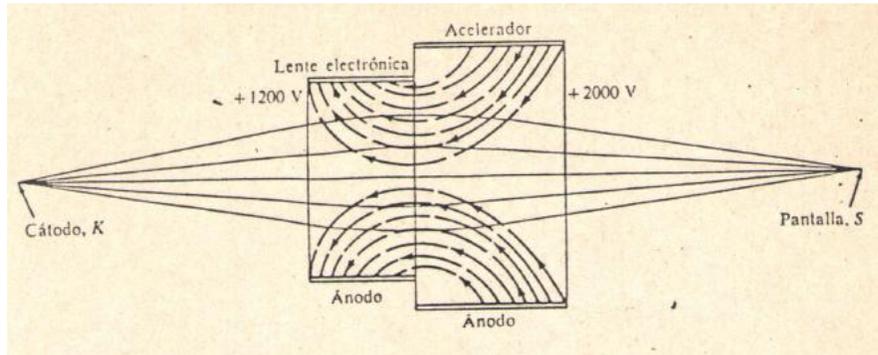
Figura 3.

2) Cañón electrónico. Está constituido por los siguientes elementos: rejilla de control, ánodos de enfoque y aceleración. Hay una diferencia de potencial relativamente alta (2 KV) entre el **cátodo** y llamado **ánodo de aceleración**, por lo que se logra la formación de un haz de electrones que se dirigen hacia el exterior del cañón a gran velocidad. Es decir, los electrones que libera el cátodo por acción del calor, al ser afectados por el campo eléctrico entre el ánodo de aceleración y el cátodo, llegan hasta este ánodo formando un caudal de electrones con gran aceleración.

La **intensidad** del haz de electrones puede ser controlada por el voltaje entre el cátodo y la rejilla de control (el potencial de la rejilla es menor que del cátodo). La rejilla de control en el TRC se diferencia de la rejilla de control de un tubo electrónico ordinario (o bulbo) en su forma cilíndrica con una abertura pequeña en la dirección del cátodo. Si la diferencia de potencial se ajusta a un valor tal que el campo eléctrico entre cátodo a rejilla de control no permite que ningún electrón pueda llegar a la rejilla, se dice que el tubo está en corte. Ya que la intensidad o brillantez de la mancha fosforescente depende del valor de la corriente del haz, — la perilla que controla la polarización negativa de rejilla, se llama CONTROL DE INTENSIDAD. Los electrones que salen de la rejilla son divergentes, por lo que es necesario corregir la trayectoria de los electrones.

Por otro lado, el voltaje entre la rejilla de control y el primer ánodo (o ánodo de enfoque), puede ser de cientos de voltios, produce un campo electrostático que acelera los electrones que logran salir de la rejilla.

El haz divergente de electrones que sale de la abertura de la reja de control es convergido y llevado para que incida en un punto fino sobre la pantalla por la acción de enfoque realizado por los dos ánodos (producen una acción denominada de lentes electrónicos). La diferencia de potencial entre el ánodo de enfoque y del ánodo de aceleración actuaran como "lente de enfoque". Para que esto ocurra el ánodo de enfoque debe estar a un potencial más bajo que el ánodo de aceleración (ver figura 4).



**Figura 4. Proceso de enfoque del haz de electrones.**

En línea con la abertura de la rejilla cilíndrica está otra abertura estrecha en el cilindro del primer ánodo y que es altamente positivo con respecto al cátodo. El siguiente cilindro, más amplio, que sigue al primer ánodo también tiene su abertura en la misma línea del haz electrónico y está operando con un potencial aún más alto. Este segundo ánodo se conoce con el nombre de ánodo de aceleración. La combinación del primer ánodo cilíndrico y el segundo ánodo cilíndrico más amplio y más positivo produce una configuración de campo eléctrico que ejerce su fuerza para desviar el haz electrónico y producir un haz delgado de electrones que gradualmente convergen en la pantalla. La acción es comparable a las lentes convergentes que desvían un haz de luz, tal que la luz converge a punto (el foco). De hecho, este arreglo del primer y segundo ánodos se conoce como "lentes electrónicos". — En la figura 4 se muestra el proceso de enfoque del haz de electrones.

El control de las lentes electrónicas que enfoca el haz electrónico exactamente sobre la superficie de la pantalla es un potenciómetro que proporciona un voltaje variable al primer ánodo, por lo que se denomina CONTROL DE FOCO. Cuando se gira este control a ambos lados de la posición correcta, se verá que la mancha de fósforo se hace más grande y se dispersa.

### 2.3.1.1.2 Desviación electrostática en los TRC.

Dos pares de placas de deflexión se muestran en la Fig. 5. El primer par (del lado del cañón) es para la deflexión vertical y el siguiente par es para la deflexión horizontal. La trayectoria del haz electrónico a través de las placas de deflexión puede ser analizada como se indica en la figura 3. La diferencia de potencial  $V_A$  aplicado al segundo ánodo, comunica a los electrones una velocidad  $v_{0x}$  hay un campo eléctrico  $E$  producido por esta diferencia de potencial  $V_A$ , tal que la fuerza sobre el electrón está dirigida en sentido positivo de X. Se puede demostrar que el electrón cuando abandona la influencia de este campo eléctrico alcanza una velocidad

$$v_{0x} = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot V_A}{m}} \quad (1)$$

También se puede demostrar que a partir de que el electrón entra al campo eléctrico de las placas de deflexión vertical, producido por la diferencia de potencial  $E_d$  aplicado entre ellas, estará sujeto a una aceleración en la dirección del eje Y igual a

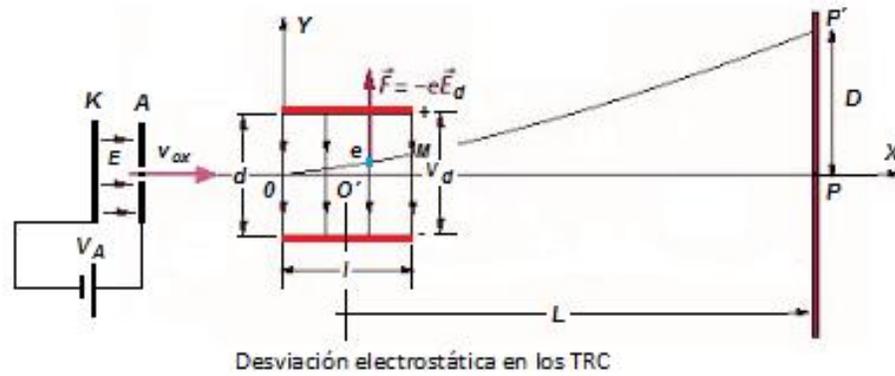
$$a_y = \frac{e \cdot E_d}{m} \quad (2)$$

Además, sujeto a una trayectoria

$$y = \frac{1}{2} \frac{e \cdot E_d}{m \cdot v_{0x}^2} \cdot x^2 \quad (3)$$

La ec.. (3) representa una parábola. Por lo tanto, se puede decir que un electrón que entra al par de placas de deflexión sigue una trayectoria parabólica, hasta salir de su influencia — en el punto M. A partir del punto M, el

electrón seguirá una trayectoria rectilínea hasta chocar en el punto P', dado que ya no existe la influencia de ningún campo eléctrico.



Se puede demostrar que la desviación D del electron desde el centro de la pantalla, después de haber pasado las placas de deflexión será

$$D = \frac{l \cdot L \cdot E_d}{2 \cdot d \cdot V_A} \quad (4)$$

En un osciloscopio, todos los parámetros de la Ec. (4): L, l, d y  $V_A$  son constantes, a excepción de  $E_d$ ; por lo que podemos escribir a la Ec. (4) como

$$D = K \cdot E_d$$

Donde **K** se define como la sensibilidad de deflexión electrostática. Tiene unidades de metros por voltio (m/V) o milímetros por voltio (mm/V).

$$G = \frac{1}{D} \quad (6)$$

A G se le llama factor de deflexión e indica cuantos voltios por cada metro (o milímetro) de deflexión deben ser aplicados.

De manera similar se puede hacer una análisis para las placas de deflexión horizontal. En conclusión, podemos ver que la diferencia de potencial entre las placas de deflexión establece la posición del haz electrónico con respecto al centro de la pantalla. Sin algún potencial aplicado a las placas de deflexión, el haz de rayos catódicos pasa entre ambos pares de placas y aparecerá como un punto brillante en el centro de la pantalla. En la figura 4 se presenta un diagrama de la vista frontal de la pantalla; ahí podemos observar la posición del impacto del haz electrónico dependiendo de los potenciales aplicados a las placas.

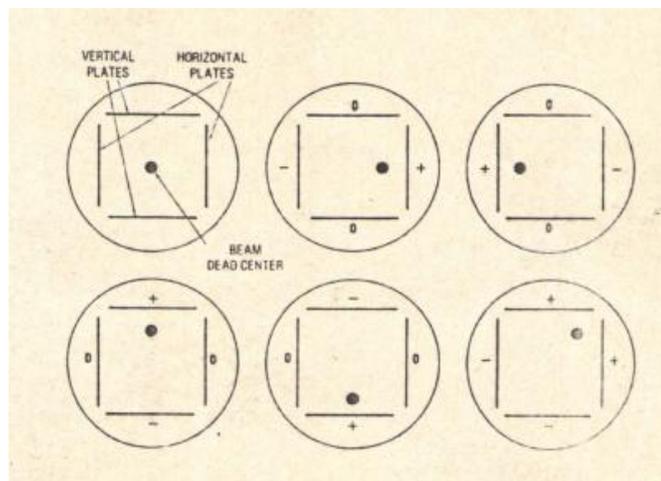


Fig.4. Posición del haz electrónico sobre la pantalla fosforescente dependiendo de las polaridades de las placas.

### 2.3.1.1.3. Base de tiempo horizontal (voltaje de barrido).

Si en lugar de aplicarle voltajes de c.d. a las placas de deflexión, les aplicamos voltajes alternos variables, el haz puede moverse sobre la pantalla fosforescente. Esta es la característica que hace posible observar formas de las señales eléctricas variables por medio de un osciloscopio.

Si se aplica una señal de diente de sierra a las placas de deflexión horizontal, tal como se indica en la figura 5, sin ningún voltaje aplicado a las placas de deflexión vertical, el haz electrónico se moverá a través de la pantalla horizontalmente de izquierda a derecha, de la misma manera que el voltaje aplicado varíe de máximo negativo, pase por cero, a un voltaje máximo positivo. Durante la parte de retorno, el voltaje de la rampa cambia muy rápidamente de positivo a negativo, — lo cual hace que el haz regrese también muy rápido. De esta manera, tenemos un trazo que irá uniformemente de izquierda a derecha en un tiempo controlable de acuerdo al período de la forma de onda de diente de sierra aplicado a las placas de deflexión. Esta señal proviene generalmente de un oscilador de período controlable llamado oscilador de barrido.

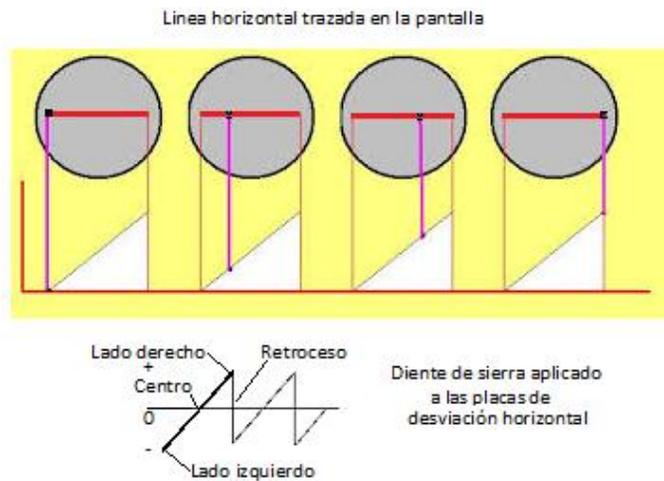
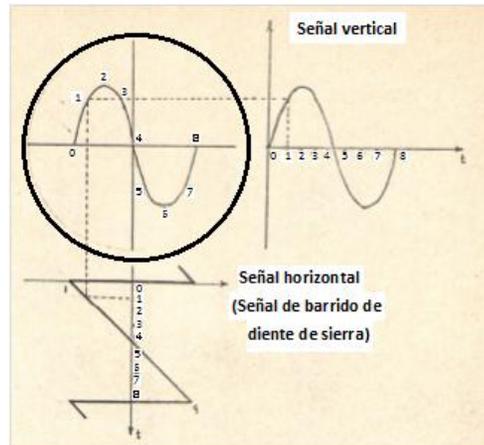


Fig. 5. Barrido horizontal de un osciloscopio.

### 2.3.1.1.4 Formación de patrones y formas de onda en el osciloscopio.

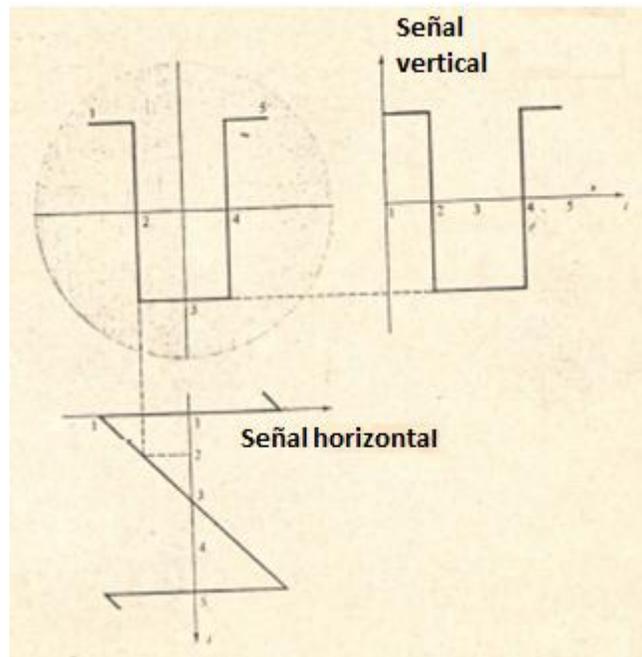
Si aplicamos ahora una señal sinusoidal de c.a. a las placas de deflexión vertical, de igual período (igual frecuencia) que el diente de sierra, la señal presentada por la pantalla del osciloscopio se muestra en la figura 6. La acción del voltaje de barrido es mover el haz electrónico a través de la pantalla (de izquierda a derecha) a una razón constante. Debe entenderse claramente que la señal vertical aplicada sola (sin barrido horizontal) dará como resultado una línea recta vertical sobre la pantalla. La aplicación simultánea de las dos señales de deflexión provocará el movimiento combinado del haz electrónico, de tal manera que se obtiene la representación de la señal aplicada a las placas de deflexión vertical. Otro ejemplo de la operación de las entradas vertical y horizontal y la presentación de pantalla resultante, se muestra en la figura 7.



**Fig. 6. Uso de la señal de barrido para formar la señal de entrada.**

Como hemos señalado anteriormente, la frecuencia de la señal de barrido es controlable, por lo que podemos en algún momento que la frecuencia de la señal de barrido sea mayor que la frecuencia de la señal aplicada a las placas de deflexión vertical. Este caso se muestra en la figura 8, donde se observa que solo una parte de la señal de entrada es presentada. Esta manera de hacer la presentación de una señal de entrada se le conoce con el nombre de magnificación.

También puede en determinado momento hacerse la frecuencia de barrido menor que la frecuencia de la señal aplicada a las placas de deflexión vertical. Este caso se muestra en la figura 9. Esto puede ocurrir cuando es necesario ver más de un ciclo completo de la la señal de entrada.



**Fig. 7. Uso de un barrido lineal para una forma de onda tipo pulso.**

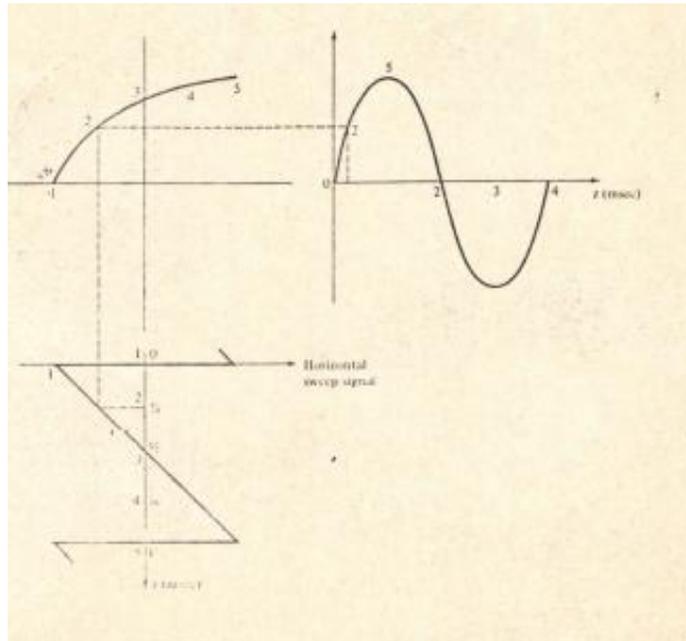


Fig. 8. Base de tiempo a una frecuencia más alta que la señal de entrada (magnificación de la señal de entrada).

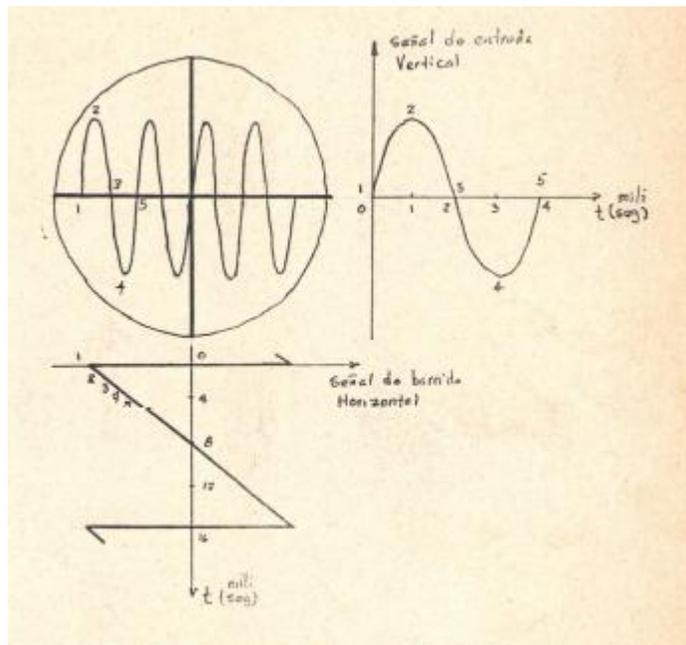


Fig. 9. Base de tiempo a una frecuencia menor que la señal de entrada (presentación de muchos ciclos en un solo barrido).

### 2.3.1.1.5 Sincronización.

En la formación de patrones de onda sobre la pantalla del osciloscopio, hemos considerado solamente casos en los que la señal de entrada vertical y la señal de barrido tienen frecuencias relacionadas. Pero, cuando la frecuencia de barrido horizontal no es la misma, o ni proporcional a la frecuencia de la señal de entrada, la presentación de la onda no se sincroniza, es decir, aparece desplazándose o no es reconocible.

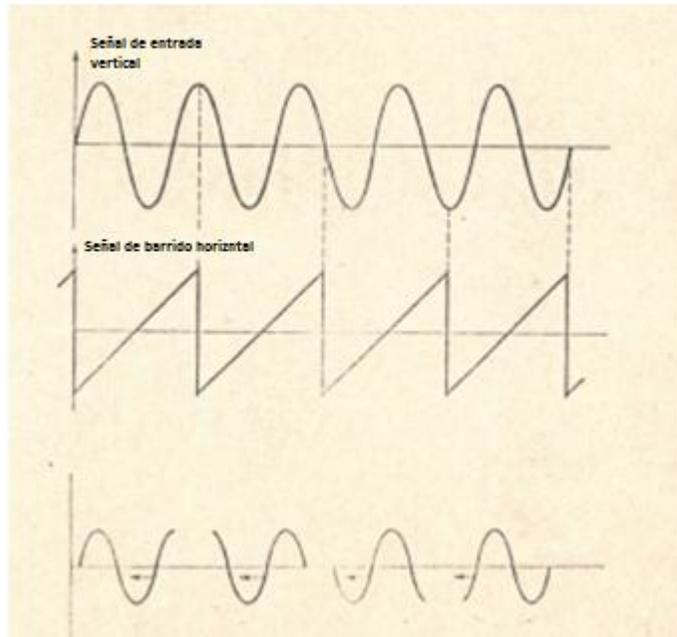


Fig. 10. Frecuencia de barrido no sincronizada, demasiada baja.

En la figura 10 se muestra la presentación resultante para un número de ciclos de la señal de barrido. Cada período del voltaje de diente de sierra horizontal, va de un máximo negativo a un voltaje máximo positivo, por lo que el haz electrónico se moverá a la vez horizontalmente a través de la cara del tubo. Luego, el voltaje del diente de sierra cae rápidamente al voltaje negativo de arranque y el haz es retardado repentinamente al lado izquierdo de la pantalla. En la mayoría de los osciloscopios, el haz electrónico es suprimido (blanked) durante este retraso, de tal manera que no aparezca ninguna línea sobre la superficie de la pantalla durante este retroceso del haz. Después de este corto tiempo de retroceso, el haz comienza otro recorrido, pero el voltaje de entrada ya no es el mismo del inicio anterior. Por lo tanto no obtendremos la misma presentación para cada ciclo de la señal de barrido; si la frecuencia de barrido es lenta en comparación con la frecuencia de la señal de entrada, la presentación tendrá un corrimiento hacia la izquierda, como puede notarse en la figura 10. En la figura 11 se muestra la presentación cuando la señal de barrido es alta y no sincronizada con respecto a la señal de entrada. Observe cuidadosamente que en cada barrido del haz arranca en un punto diferente en el ciclo de la señal de entrada y que se forman diferentes presentaciones.

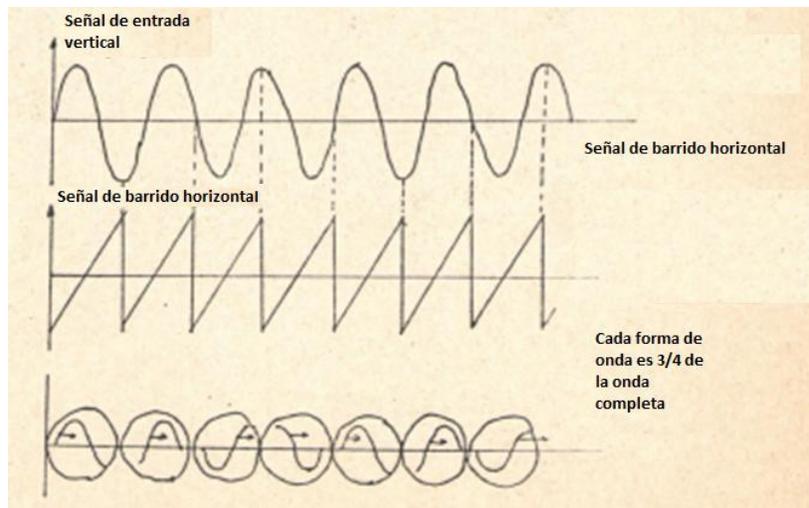


Fig. 11. Frecuencia de barrido demasiado alta (corrimiento aparente hacia la derecha).

El método usual de sincronizar la señal de entrada usa una parte de ésta señal para disparar (trigger) al generador de barrido de tal manera que el inicio de la señal de barrido es amarrada o sincronizada a la señal de entrada. Cuando se usa señal de barrido disparada (triggered sweep), para arrancar el voltaje de barrido lineal horizontal, no comienza inmediatamente despues del final del tiempo de retroceso, sino solamente cuando ocurre la señal de disparo. Así, el barrido no ocurre a una razón repetitiva fija determinada por el período del ciclo de la señal del diente de sierra, sino por cada ciclo de la sefal disparadora. En la figura 12 se muestra la operación de una señal de barrido y el disparo del generador de barrido.

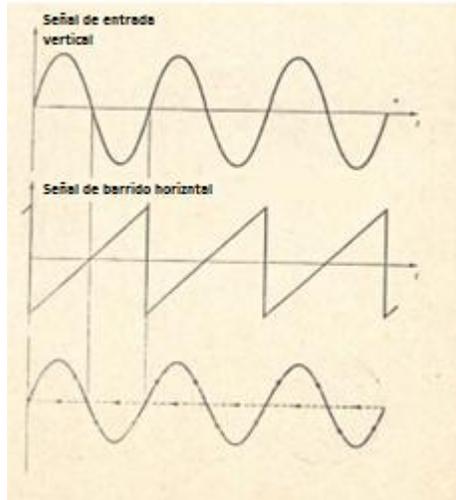


Fig. 12. Barrido disparado.

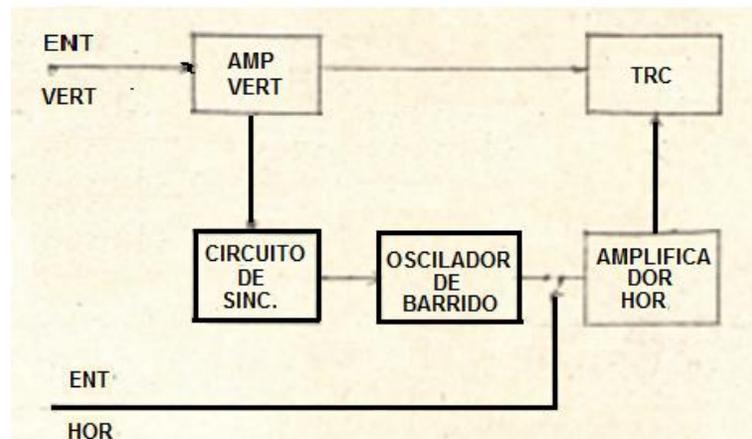


Fig. 13. Diagrama a bloques simplificado de un osciloscopio básico.

### 2.3.1.2 Mediciones con el osciloscopio.

El osciloscopio permite efectuar mediciones de diferencia de potencial (voltaje) sobre el eje vertical de la pantalla y de tiempo sobre el eje horizontal. En general, las mediciones que se pueden efectuar con este instrumento, son:

1. **Medida de voltaje:** se realiza sobre el eje vertical de la pantalla, teniendo en cuenta el factor de sensibilidad seleccionado por la perilla *V/div*.
2. **Medida del tiempo del periodo:** se realiza sobre el eje horizontal de la pantalla, teniendo en cuenta el factor de barrido seleccionado por la perilla *time/div*.

**3. Medida de frecuencia:** se calcula como la inversa del periodo medido sobre el eje horizontal como se indicó en el párrafo anterior. (Existe otra manera, por medio de las figuras de Lissajous, la cual consiste en trabajar con el osciloscopio en el modo XY).

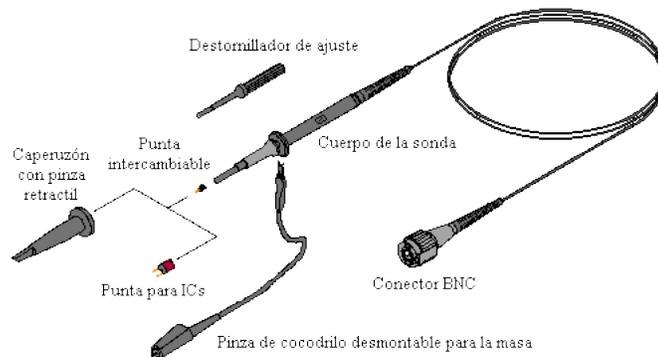
**4. Medida de fase:** empleando un osciloscopio de doble canal, se puede medir el desfase temporal entre dos señales directamente sobre el eje horizontal (luego se podrá calcular su equivalente en grados o radianes).

**5. Medida de corriente:** un procedimiento para medir corriente en una rama consiste en medir el voltaje sobre una R. Como la corriente y la tensión sobre el R se encuentran en fase, para obtener los valores de corriente se debe aplicar la Ley de Ohm. Si la rama en cuestión no posee un elemento resistivo, se mide la tensión sobre un R de pequeño valor (para no alterar demasiado el circuito) colocado en serie con los demás elementos de la rama.

### 2.3.1.3 Sondas o puntas de prueba

La mayoría de las **puntas de prueba** están marcadas con un factor de atenuación, normalmente 10X ó 100X. Por convenio los factores de atenuación aparecen con el signo X detrás del factor de división. En contraste los factores de amplificación aparecen con el signo X delante (X10 ó X100).

La sonda más utilizada posiblemente sea la 10X, reduciendo la amplitud de la señal en un factor de 10. Su utilización se extiende a partir de frecuencias superiores a 5 kHz y con niveles de señal superiores a 10 mV. La sonda 1X es similar a la anterior pero introduce más carga en el circuito de prueba, pero puede medir señales con menor nivel. Por comodidad de uso se han introducido sondas especiales con un conmutador que permite una utilización 1X ó 10X. Cuando se utilicen este tipo de sondas hay que asegurarse de la posición de este conmutador antes de realizar una medida.



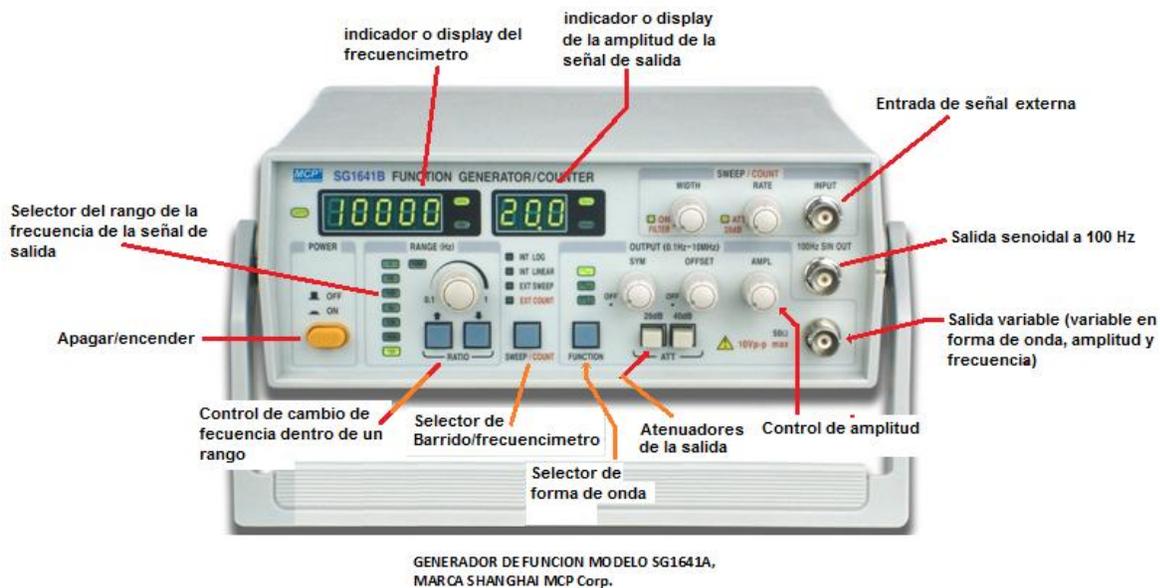
### 2.3.2. Generador de señales.

Un generador de funciones es un instrumento versátil<sup>12</sup> que genera diferentes formas de **señales de salida de c.a.** con amplitud variable y frecuencia ajustable y controlada en un amplio rango. Las formas de salida más comunes son ondas senoidal, triangular y cuadrada. También son muy utilizadas las señales TTL que pueden ser utilizadas como señal de prueba o referencia en circuitos digitales.

<sup>12</sup> Que se adapta a situaciones diversas con facilidad

### 2.3.2.1 Descripción

El generador que se utiliza en el laboratorio de electrónica es el modelo **SG1641A**, marca **SHANGHAI MCP Corp.**



Aunque existen multitud de generadores de función (algunos de mayor o menor complejidad que otros), todos incorporan ciertas funciones y controles básicos que pasamos a describir a continuación.

*Interruptor de apagar/encender (ON/OFF).* Enciende y apaga el instrumento.

*Selector de funciones o de forma de onda.* Controla la forma de onda de la señal de salida. Como se dicho, puede ser triangular, cuadrada o senoidal.

*Selector de rango de frecuencia.* Selecciona el rango o margen de frecuencias de trabajo de la señal de salida. Su valor va determinado en décadas, es decir, de 1 a 10 Hz, de 10 a 100, de 100 a 1 KHz, etc. El rango total del instrumento es: 0.1 Hz a 10 MHz.

*Control de cambio de frecuencia.* Regula de manera continua la frecuencia de salida dentro del rango seleccionado.

*Control de amplitud.* Mando que regula la amplitud de la señal de salida.

*DC offset.* Regula la tensión continua de salida que se superpone a la señal variable en el tiempo de salida.

*Atenuador de salida.* Ofrece la posibilidad de atenuar la señal de salida 20 dB (100 veces) o, 40 dB (1000) sobre la amplitud seleccionada con el control de amplitud.

*Salida a 50 ohm.* Conector de salida que entrega la señal elegida con una impedancia de 50 ohmios.

*Indicador o display del contador o frecuencímetro digital.* Indica el valor de la frecuencia entregada en la salida variable (OUT 50 Ω), o la frecuencia aplicada a la entrada de señal externa (INPUT).

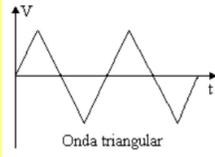
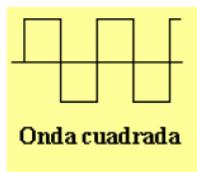
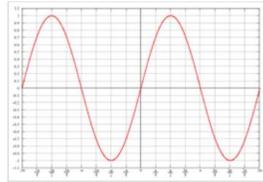
*Indicador o display de la amplitud de salida.* Indica el valor del voltaje pico a pico de la señal de salida.

### 2.3.2.2 Recomendaciones generales para empezar a utilizar el generador.

Lo primero que deberemos realizar será seleccionar el tipo de señal de salida que necesitamos (triangular, cuadrada o



senoidal) por medio del selector



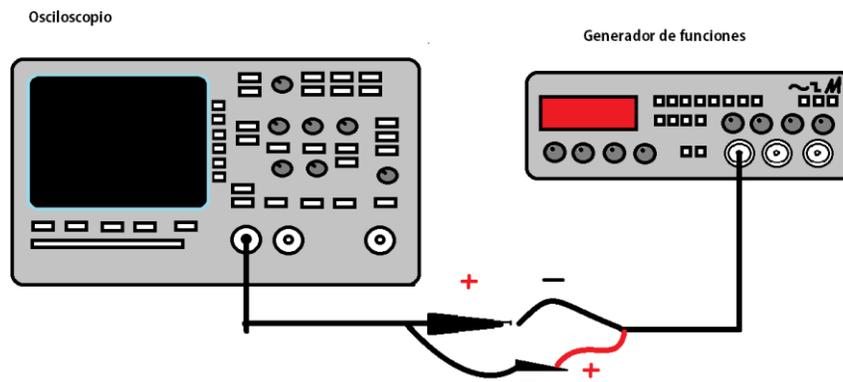
A continuación se debe fijar la frecuencia de trabajo utilizando los selectores de rango y mando de ajuste. Muchos generadores de funciones modernos incorporan contadores de frecuencia que permiten un ajuste preciso, no obstante y en caso de ser necesario se pueden utilizar contadores de frecuencia externos, osciloscopios o incluso analizadores de espectros para determinar la frecuencia con mayor precisión.

El siguiente paso será cargar la salida y fijar la amplitud. Como en el caso del ajuste de frecuencia, podemos utilizar

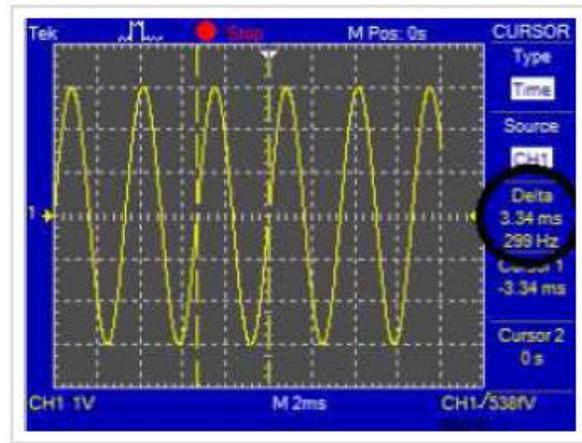
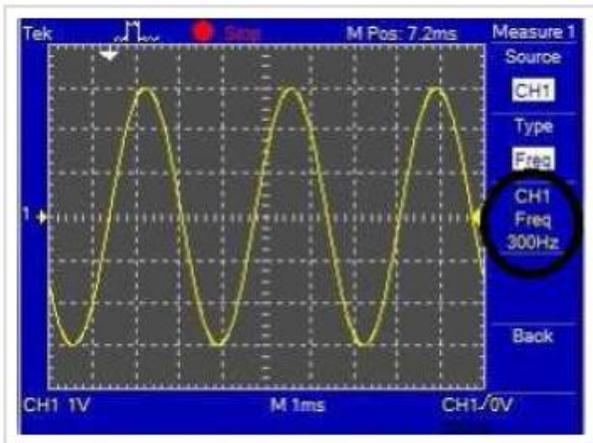


distintos equipos de medida para ajustar el valor de amplitud . Para niveles de potencia bajos será necesario activar el atenuador interno del generador.

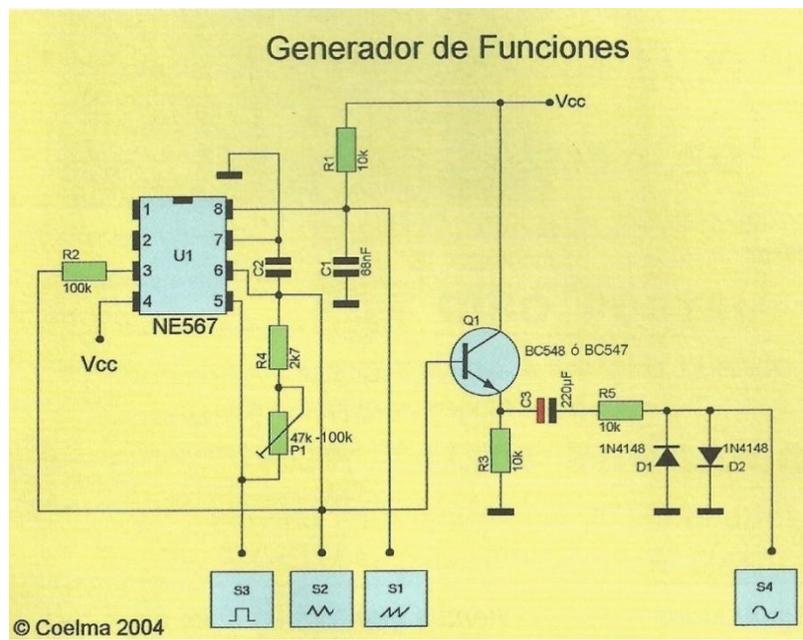
Una vez configuradas las magnitudes se conecta el generador de señales al osciloscopio en cualquiera de los canales que tiene, en este caso se conecta al canal 1.



Con lo que se puede proceder a medir la señal aplicada acondicionando debidamente los selectores de la sensibilidad y el tiempo de barrido del osciloscopio.



Diagramas de un generador de funciones.





# Contenido

UNIDAD 2 .....	93
Instrumentos Básicos y Avanzados .....	93
2.1 INTRODUCCIÓN.....	93
2.2 FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN Y APLICACIÓN DE INSTRUMENTOS MEDIDORES ANALÓGICOS Y DIGITALES. ....	94
2.2.1 Medidores analógicos de c.d.....	94
2.2.1.1 Galvanómetro D' Arsonval. ....	94
2.2.1.1.1 Construcción. ....	95
2.2.1.1.2 Principio de funcionamiento del galvanómetro.....	96
2.2.1.2 Galvanómetro electrodinamómetro .....	97
2.2.1.3 El amperímetro analógico de c.d. ....	98
2.2.1.3.1 Ampliación del rango de un amperímetro .....	99
Ejemplo 2.1 .....	100
2.2.1.3.2 El derivador de Ayrton. ....	100
Ejemplo 2.2. ....	101
2.2.1.4 Voltímetros analógicos de c.d. ....	102
Ejemplo 2.3 .....	102
Sensibilidad de un voltímetro .....	103
Ejemplo 2.4 .....	103
2.1.1.5 Óhmetro .....	104
2.1.1.5.1 Óhmetro serie simple.....	104
2.1.1.5.2 Construcción de la carátula del óhmetro por medio de la tabla de calibración. ....	104
2.1.1.5.3 Óhmetro tipo serie con ajuste de cero. ....	106
Ejemplo 2.5. ....	108
2.1.1.5.4 Óhmetro tipo derivación.....	109
Ejemplo 2.6. ....	111
2.1.1.6 Multímetros analógicos de c.a. y c.d.....	112
2.2.2 Medidores Digitales. ....	116
2.2.2.1 Significado de " $\frac{1}{2}$ " dígito en un DVM. ....	118
2.2.2.2 Funcionamiento del DVM/DMM.....	118
2.2.2.2.1 Comparadores.....	120
2.2.2.2.2 Convertidores digital-analógico. ....	121
2.2.2.2.2.1 Red sumadora resistiva de peso binario. ....	122
2.2.2.2.2.2 La red sumadora resistiva en escalera. ....	123
2.2.2.2.2.3 Convertidores D/A multiplicadores.....	125
2.2.2.2.3 Convertidores analógico-digital. ....	125
2.2.2.2.3.1 Convertidores A/D de rampa de escalera. ....	126
2.2.2.2.3.2 Convertidores A/D de aproximaciones sucesivas. ....	126

2.2.2.2.3.3 Convertidores A/D de doble rampa .....	128
2.2.2.2.3.4 Convertidor de voltaje a frecuencia .....	129
2.2.2.2.4 Conteo y codificación digital .....	130
2.2.2.2.5 Dispositivos de despliegue .....	132
2.2.2.3 Voltímetros digitales .....	134
2.2.2.3.1 Interpretación de las Especificaciones de Exactitud de los Voltímetros Digitales .....	134
2.2.2.3.2 Particularidades y Especificaciones Adicionales de los Voltímetros Digitales .....	135
2.3. FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN Y APLICACIÓN DE OTROS INSTRUMENTOS DE MEDICION .....	136
2.3.1. Osciloscopio analógico .....	136
2.3.1.1 Descripción de las partes fundamentales de un osciloscopio.....	136
2.3.1.1.1 El tubo de rayos catódicos (TRC).....	138
2.3.1.1.2 Desviación electrostática en los TRC.....	140
2.3.1.1.3. Base de tiempo horizontal (voltaje de barrido) .....	142
2.3.1.1.4 Formación de patrones y formas de onda en el osciloscopio .....	142
2.3.1.1.5 Sincronización .....	144
2.3.1.2 Mediciones con el osciloscopio.....	146
2.3.1.3 Sondas o puntas de prueba.....	147
2.3.2. Generador de señales .....	147
2.3.2.1 Descripción.....	148
2.3.2.2 Recomendaciones generales para empezar a utilizar el generador .....	149
2.3.2.3 Las partes principales en el interior de un generador .....	151

## Unidad 3 Medición de parámetros

La ignorancia no es la ausencia de conocimientos,  
sino el hecho de negarse a adquirirlos.

*Karl Popper*

- 3.1. Medición y prueba de dispositivos y elementos.
  - 3.1.1. Resistencias.
  - 3.1.2. Inductancia y capacitancia.
  - 3.1.3. Mediciones con puentes.
  - 3.1.4. Prueba de dispositivos semiconductores.
- 3.2. Medición de potencia y energía.
  - 3.2.1. Potencia y energía en c.d.
  - 3.2.2. Potencia y energía en c.a.
- 3.3. Efectos de carga de los instrumentos en las mediciones.
  - 3.3.1. Impedancia de los instrumentos de medición.
  - 3.3.2. Sondas o puntas de prueba

### 3.1. Medición y prueba de dispositivos y elementos.

#### 3.1.1. Resistencias.

La medida de resistencias puede ser obtenida directa o indirectamente. En el primer caso se obtiene el valor de la magnitud a medir por el dispositivo directamente de lectura del instrumento de medida (el óhmetro) como resultado de su comparación con la medida patrón. El método directo, por medio del óhmetro, ya fue tratado en el capítulo II. Ahora se extenderá este tema estudiando la medición de esta magnitud orientado hacia el método indirecto.

Primero se tratará el método del voltímetro-amperímetro y posteriormente el puente de Wheatstone. Los métodos del óhmetro y del voltímetro-amperímetro se emplean con mucha frecuencia para pruebas y determinación aproximada de valor de resistencia. A continuación se mostrará el puente de Wheatstone, el instrumento a seleccionar cuando se desea una medición muy exacta de valores de resistencia o el monitoreo de señales de salida de los transductores resistivos. Por último, se analizarán técnicas adicionales que se deben emplear para medir valores de resistencia muy bajos o muy altos. Los dispositivos de medición de resistencia que emplean esas técnicas, incluyendo al puente de Kelvin. Antes de abordar lo que respecta a la medición, es conveniente revisar brevemente la teoría de acerca de la resistividad eléctrica.

#### 3.1.2 Conductividad y resistencia eléctrica.

Las resistencias eléctricas son componentes elementales de cualquier circuito, que se utilizan para controlar la intensidad de la corriente a un determinado valor.

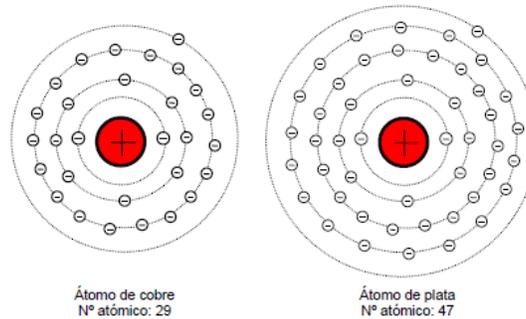


La posibilidad de que exista una corriente eléctrica a través de un material se debe a que los electrones de valencia de sus átomos puedan desprenderse del átomo debido a alguna influencia de un campo eléctrico externo y con una fuerza  $\vec{F} = -e \cdot \vec{E}$ , consecuencia de que exista una diferencia de potencial o voltaje en sus extremos. En los circuitos eléctricos se utilizan materiales con diversos grados de facilidad de conducción de una corriente eléctrica, los cuales algunos se denominan conductores o aislantes. Esta propiedad eléctrica se conoce como conductividad y se representa por medio de la letra griega  $\sigma$ .

Los materiales que son mejores conductores de la electricidad tienen átomos con menos electrones de valencia y más alejados del núcleo; en general, mayor es su conductividad  $\sigma$ , los que tienen la posibilidad de poseer muchos electrones libres (ver tabla de conductividad). Todos los metales tienen este tipo de configuración electrónica, por lo que son más o buenos conductores de electricidad debido a permiten con

mucha la facilidad del movimiento ordenado y en una determinada dirección (o sea, de una corriente eléctrica) debido a que sus electrones son liberados fácilmente por la aplicación una fuerza  $F$ , consecuencia del campo eléctrico exteriormente aplicado.

En general, son los mejores conductores de electricidad la plata seguida del cobre, cuya estructura atómica se representa en la figura 1.10.



**Figura 1.10. Estructuras de los átomos de cobre y plata; los materiales mejores conductores de la electricidad.**

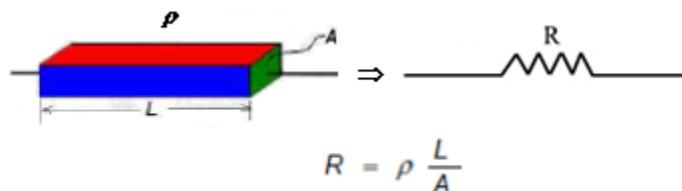
#### Algunas conductividades y resistividades eléctricas

La resistividad es la inversa de la conductividad, lo cual implica que a mayor conductividad menor resistividad; por tanto,

$$\rho = \frac{1}{\sigma}, \text{ y su unidad es el S/m (siemens por metro) o } \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}.$$

	Material	Conductividad Eléctrica ( $\sigma$ ) ( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )	Resistividad Eléctrica ( $\rho$ ) ( $\Omega \cdot \text{m}$ )
Metal	Grafeno	$9,60 \times 10^7$	$1.04 \times 10^{-8}$
	Plata	$6,30 \times 10^7$	$1.58 \times 10^{-8}$
	Cobre	$5,96 \times 10^7$	$1.68 \times 10^{-8}$
	Oro	$4,55 \times 10^7$	$2.21 \times 10^{-8}$
	Aluminio	$3,78 \times 10^7$	$2.65 \times 10^{-8}$
Semiconductores	Carbono	$2,80 \times 10^4$	$(3-60) \times 10^{-5}$
	Germanio	$2,20 \times 10^{-2}$	$(1-500) \times 10^{-3}$
	Silicio	$1,60 \times 10^{-5}$	$(0,1-60)$
Aislantes	Vidrio	$10^{-10}$ a $10^{-14}$	$10^{10}$ a $10^{14}$
	Mica	$10^{-11}$ a $10^{-15}$	$10^{11}$ a $10^{15}$
	Cuarzo	$1,33 \times 10^{-18}$	$7,5 \times 10^{17}$
	Agua de mar	5	0.2
	Agua potable	0,0005 a 0,05	$2 \times 10^3$ a 20

La resistencia eléctrica  $R$  de un barra de material que tiene longitud  $L$  y area transversal  $A$ , se puede obtener por medio del siguiente procedimiento:



Se puede ver que la resistencia  $R$ , depende del material (de su resistividad  $\rho$ ) y de la forma del material (de la longitud y el área). Son diferentes los valores de  $R$  para barras del mismo material y diferentes formas. Es decir, que si se altera la forma de la misma barra, el valor de  $R$  también se altera.

Como quedó dicho en la Unidad I, la unidad de resistencia es el ohm ( $\Omega$ ): Un elemento tiene una resistencia de 1 ohm cuando se le aplica una diferencia de potencial de 1 volt y circula por ella una corriente de 1 ampere.

La resistividad eléctrica del material  $\rho$  se le considera una constante que depende solo del tipo de material. Pero un estudio de mayor profundidad, lleva descubrir que la resistividad de todos los conductores metálicos crece con el aumento de la temperatura. En un intervalo de temperaturas no demasiado grande, la resistividad de un metal puede representarse aproximadamente por la ecuación:

$$\rho = \rho_o [1 + \alpha(T - T_o)] \quad (2)$$

donde  $\rho_o$  es la resistividad a una temperatura de referencia  $T_o$  y  $\rho$  es la resistividad a la temperatura  $T$ . El factor  $\alpha$  se denomina coeficiente de temperatura de resistividad.

Como la resistencia  $R$  de cualquier material es proporcional a su resistividad, la cual varía con la temperatura, también la resistencia variará con ella. En intervalos de temperaturas no demasiado grandes, esta variación se puede representar aproximadamente por una relación lineal análoga a la ecuación (3):

$$R(T) = R_o [1 + \alpha(T - T_o)] \quad (3)$$

Tabla de coeficientes de variación de resistencia por grado de temperatura

Material	$\alpha$	Material	$\alpha$
Aluminio	0.0039	Plata	0.0038
Manganita	nulo	Estaño	0.0042
Advance	0.00002	Platino	0.0025
Mercurio	0.00089	Hierro	0.0052
Bronce fosforoso	0.002	Plomo	0.0037
Nicromio	0.00013	Kruppina	0.0007
Carbón	0.0005	Tungsteno	0.0041
Níquel	0.0047	Latón	0.002
Niquelina	0.0002	Wolframio	0.0045
Cobre	0.00382	Oro	0.0034

**Ejemplo:** Se tiene un alambre conductor de cobre con resistencia  $R_{t_0} = 20$  ohmios, a una temperatura de  $10^\circ\text{C}$ . Cuál será el nuevo valor de resistencia del conductor de cobre, si la temperatura sube a  $70^\circ\text{C}$ ?

Aplicando la fórmula (3), con los siguientes valores:

- $R_{t_0} = 20$  ohmios
- $\alpha = 0.00382$  (cobre)
- $t_f = 70^\circ\text{C}$
- $t_o = 10^\circ\text{C}$

Se obtiene:

$$R_{t_f} = 20 [1 + 0.00382 (70 - 10)] = 24.584 \text{ ohmios. (Aumentó 4.584 ohmios de su valor original)}$$

### 3.1.3 Las resistencias eléctricas comerciales.

#### 3.1.3.1 Clasificación de las resistencias por su valor:

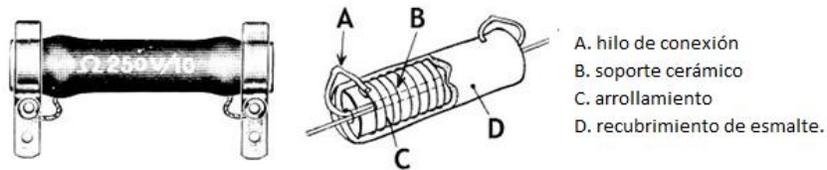
Las resistencias se fabrican en muy diversos tipos, pero una primera clasificación se da en dos grupos: fijas y variables.



#### 3.1.3.2 Clasificación de las resistencias por su construcción:

##### 3.1.3.2.1 Resistencias de hilo bobinado.-

Fueron de los primeros tipos en fabricarse, y aún se utilizan cuando se requieren potencias de disipación elevadas. Están constituidas por un hilo metálico bobinado en forma de hélice o espiral (a modo de rosca de tornillo) sobre un cilindro de cerámica.



### 3.1.3.2 Resistencias de carbón prensado.-

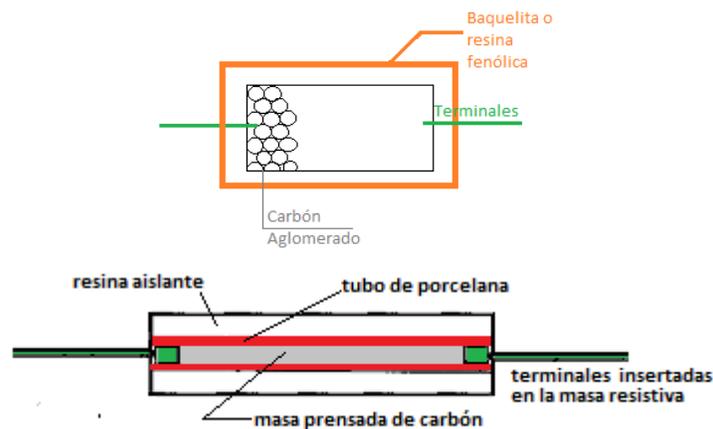
Las resistencias de hilo de valor óhmico elevado necesitarían una cantidad de hilo tan grande que en la práctica resultarían muy voluminosas. Las resistencias de este tipo se realizan de forma más sencilla y económica empleando, en lugar de hilo, carbón pulverizado mezclado con sustancias aglomerantes.<sup>1</sup>

La relación entre la cantidad de carbón y la sustancia aglomerante determina la resistividad por centímetro, por lo que es posible fabricar resistencias de diversos valores. Existen tipos de carbón aglomerado, de película de carbón y de película metálica. Normalmente están constituidas por un soporte cilíndrico aislante (de porcelana u otro material análogo) sobre el cual se deposita una capa de material resistivo.

Estas resistencias fueron de las primeras en fabricarse en los albores de la electrónica. Están constituidas en su mayor parte por grafito en polvo, el cual se prensa hasta formar un tubo como el de la figura. Las patas de conexión se implementaban con hilo enrollado en los extremos del tubo de grafito. **Muy poco recomendables**, ya que son muy sensibles a la temperatura, pudiendo afectarles incluso el proceso de soldadura. Su valor de tolerancia en ningún caso es menor al 10%. Estas resistencias son también muy sensibles al paso del tiempo, y variarán ostensiblemente su valor con el transcurso del mismo.



Posteriormente se mejoró el sistema mediante un tubo hueco cerámico (figura inferior) en el que se prensaba el grafito en el interior y finalmente se disponían unas bornas a presión con patillas de conexión.



### 3.1.3.2.3 Resistencias de película de carbón.-

Este tipo es una evolución de las anteriores, muy habitual hoy día, y es utilizada para valores de hasta 2 watts. Se utiliza un tubo cerámico o de porcelana como núcleo sobre el que se deposita una película de carbón tal como se aprecia en la figura. Los terminales metálicos se introducen en los extremos del conjunto mediante una especie de capuchones y posteriormente se recubre todo ello con lacas ignífugas<sup>2</sup> para aislar la resistencia. Este tipo tiene bajo nivel de ruido y las tolerancias están en torno al 5% del valor nominal de la resistencia.

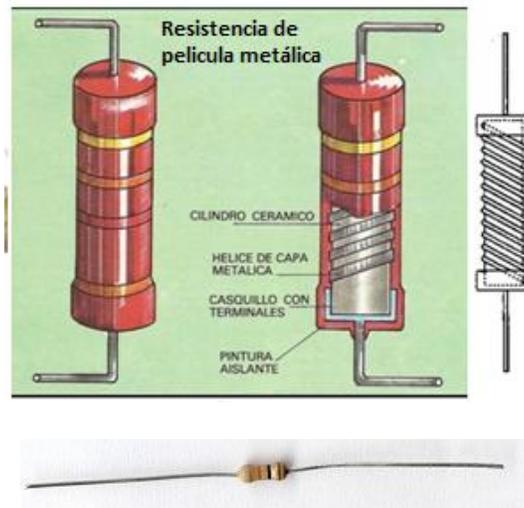
<sup>1</sup> Los **aglomerantes** son materiales capaces de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por métodos exclusivamente físicos.

<sup>2</sup> Que protege contra el fuego.



### 3.1.3.2.4 Las Resistencias de película metálica.

Este tipo de resistencia es la que mayoritariamente se fabrica hoy día. Están formadas por una película metálica sobre un cilindro de cerámica, al que se fijan los terminales y se los encapsula igual que la resistencia de carbón, por lo que su aspecto exterior es igual al de una resistencia de carbón. Se usan solamente cuando se necesita una gran exactitud en el valor de resistencia. También soportan mejor el paso del tiempo, permaneciendo su valor en ohms durante mayor tiempo. Se fabrican este tipo de resistencias de hasta 2 watts de potencia, y con tolerancias del 1% como tipo estándar.



Las conexiones externas se hacen mediante crimpado<sup>3</sup> de cazoletas<sup>4</sup> metálicas a las que se une hilos de cobre bañados en estaño para facilitar la soldadura. Al conjunto completo se le baña de laca ignífuga y aislante o incluso vitrificada para mejorar el aislamiento eléctrico. Se consiguen así resistencias con una tolerancia del 5% o mejores, además tienen un ruido térmico inferior a las de carbón prensado, ofreciendo también mayor estabilidad térmica y temporal que éstas.

### 3.1.3.2.5 Resistencias de hilo o bobinadas

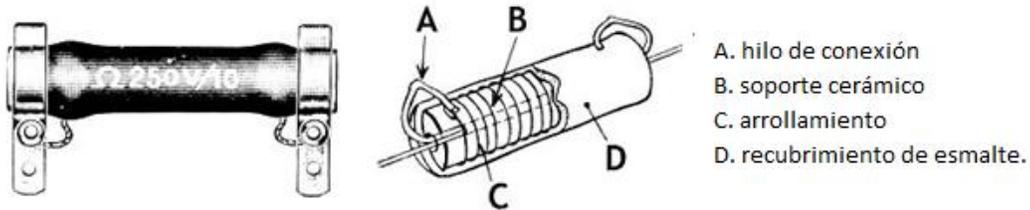
Generalmente están constituidas por un soporte de material aislante y resistente a la temperatura (cerámica, esteatita, mica, etc.) alrededor del cual hay la resistencia propiamente dicha, constituida por un hilo cuya sección y resistividad depende de la potencia y de la resistencia deseada.

En los extremos del soporte hay fijados dos anillos metálicos sujetos con un tornillo o remache cuya misión, además de fijar en él el hilo de resistencia, consiste en permitir la conexión de la resistencia mediante soldadura. Por lo general, una vez construidas, se recubren de un barniz especial que se somete a un

<sup>3</sup> Se denomina **crimpar** o *corrugar* al procedimiento de empalme de los conectores telefónicos. Proviene de verbo inglés *crimp*, que significa rizar.

<sup>4</sup> Pieza de metal de forma más o menos semiesférica que tienen las espadas y sables entre el puño y la hoja para proteger la mano.

proceso de vitrificación a alta temperatura con el objeto de proteger el hilo y evitar que las diversas espiras hagan contacto entre sí. Sobre este barniz suelen marcarse con serigrafía los valores en ohmios y en vatios, tal como se observa en esta figura. En ella vemos una resistencia de  $250 \Omega$ , que puede disipar una potencia máxima de 10 vatios.



### 3.1.3.2.6 Resistencias de película de óxido metálico.-

Son muy similares a las de película de carbón en cuanto a su modo de fabricación, pero son más parecidas, eléctricamente hablando a las de película metálica. Se hacen igual que las de película de carbón, pero sustituyendo el carbón por una fina capa de óxido metálico (estaño o latón). Estas resistencias son más caras que las de película metálica, y no son muy habituales. Se utilizan en aplicaciones militares (muy exigentes) o donde se requiera gran fiabilidad, porque la capa de óxido es muy resistente a daños mecánicos y a la corrosión en ambientes húmedos.



### 3.1.3.2.7 Resistencias de metal vidriado.-

Son similares a las de película metálica, pero sustituyendo la película metálica por otra compuesta por vidrio con polvo metálico. Como principal característica cabe destacar su mejor comportamiento ante sobrecargas de corriente, que puede soportar mejor por su inercia térmica que le confiere el vidrio que contiene su composición. Se dispone de potencias de hasta 3 vatios.

Se dispone de estas resistencias encapsuladas en chips tipo DIL (dual in line) o SIL (single in line).



Chips encapsulados tipo DIL  
(dual in line)



Resistencia  
de  
metal vidriado

### 3.1.3.3 Valores nominales de una resistencia eléctrica.

Para utilizar de manera práctica una resistencia se debe conocer tres valores característicos: el valor nominal de la resistencia, expresado en óhms ( $\Omega$ ), la tolerancia en % y el valor nominal de la potencia en watts (W).

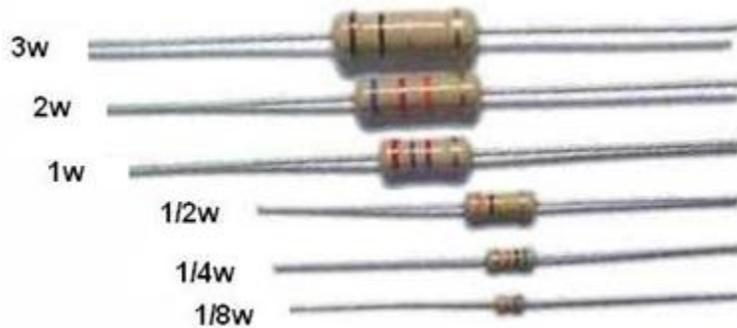
a) *Valor nominal de la resistencia.* Suele venir indicado, bien con un código de colores, bien con caracteres alfanuméricos.

b) *Tolerancia.* El valor nominal de la resistencia normalmente es diferente del valor real (valor medido), pues influyen diferentes factores de los procesos de fabricación o del medio ambiente. La tolerancia dada como

un % del valor nominal de la resistencia, establece un rango de valores alrededor valor nominal, garantizados por el fabricante a ser obtenidos como valores reales. Es decir, el fabricante garantiza que el valor real de la resistencia va a estar siempre contenido entre estos valores, Si esto no es así, el componente está defectuoso.

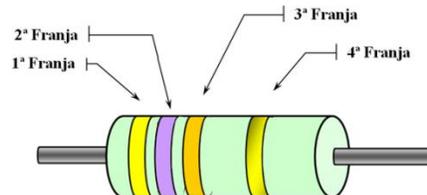
c) *Potencia nominal.* Las resistencias tienen una potencia nominal que indica el valor de la potencia que la resistencia puede disipar con seguridad sin que se dañe. Cuando la corriente recorre la resistencia, se produce calor. La resistencia convierte energía eléctrica en energía calorífica. Si se permite sobrepasar la corriente a partir de cierto valor, el calor quema la resistencia. Así que debe conocerse el nivel de disipación de calor de una resistencia y es esto lo indica la potencia nominal.

No hay relación entre la resistencia nominal y la potencia nominal de una resistencia. Puede obtenerse el mismo valor de resistencia en resistencias de potencias nominales que van desde menos de un watt a muchos watts. La potencia nominal de una resistencia se determina principalmente por su tamaño físico y el tipo de materiales usados. La figura muestra seis resistencias fijas con distintas potencias nominales. La mayor es de 3 W. Descendiendo en el orden, las otras son de 2, 1, 1/2, 1/4 y 1/8 W.



### 3.1.3.4 Empleo del código colores para obtener el valor nominal de la resistencia y tolerancia de una resistencia eléctrica.

*Código de colores*



El código de colores de cuatro bandas de las resistencias de carbón.

Color	1ª y 2ª bandas de color	Multiplicador	Tolerancia
Negro	0	x 1	-
Marrón	1	x 10	± 1 %
Rojo	2	x 100	± 2 %
Naranja	3	x 1000	-
Amarillo	4	x 10000	-
Verde	5	x 100000	± 0'5 %
Azul	6	x 1000000	-
Violeta	7	x 10000000	-

Gris	8	x 100000000	-
Blanco	9	x 1000000000	-
Oro	-	: 10	± 5 %
Plata	-	: 100	± 10 %

La interpretación del código de colores es:

1º- Se coloca la resistencia de forma adecuada, con la tolerancia en la parte derecha.

2º- Se sustituye cada color por su valor correspondiente en la tabla de correspondencia.

1ª cifra = amarillo = 4

2ª cifra = violeta = 7

Multiplicador = naranja = x1000

Tolerancia = oro = ±5%

3º- El valor nominal será:  $V_{nominal} = 47000 \Omega \pm 5\%$

4º- Los valores mínimo y máximo serán:

Valor mínimo = valor nominal – (valor nominal \* Tolerancia) /100 =  $47000 - (47000 * 5) /100$   
= 44650  $\Omega$

Valor máximo = valor nominal + (valor nominal \* Tolerancia) /100 =  $47000 + (47000 * 5) /100$   
= 49350  $\Omega$

5º- El valor real de la resistencia se encontrará entre 44650  $\Omega$  y 49350  $\Omega$ .

### Ejemplos:

1.- Indica el valor en código de colores de las siguientes resistencias:

Valor	1ª cifra	2ª cifra	Multiplicador	Tolerancia
100 $\Omega \pm 5\%$				
220 $\Omega \pm 10\%$				
4700 $\Omega \pm 5\%$				
68000 $\Omega \pm 20\%$				

### Solución:

Valor	1ª cifra	2ª cifra	Multiplicador	Tolerancia
100 $\Omega \pm 5\%$	marrón	negro	marrón	oro
220 $\Omega \pm 10\%$	rojo	rojo	marrón	plata
4700 $\Omega \pm 5\%$	amarillo	violeta	rojo	oro
68000 $\Omega \pm 20\%$	azul	gris	naranja	sin color

2.- Completa el valor de cada resistencia si conocemos los colores de que está compuesta.

1ª cifra	2ª cifra	Multiplicador	Tolerancia	Valor	V máx	V min
marrón	negro	rojo	oro			
gris	rojo	oro	oro			
rojo	violeta	verde	plata			
violeta	verde	negro	oro			

**Solución:**

1ª cifra	2ª cifra	Multiplicador	Tolerancia	Valor	V máx	V min
marrón	negro	rojo	oro	1000 Ω ±5%	1050 Ω	950 Ω
gris	rojo	oro	oro	8,2 Ω ±5%	8,61 Ω	7,79 Ω
rojo	violeta	verde	plata	2700000 Ω ±10%	2970000 Ω	2430000 Ω
violeta	verde	negro	oro	75 Ω ±5%	78,75 Ω	71,25 Ω

**3.1.3.5 Medición de resistencia por el método de amperímetro-voltímetro**

La importancia de la medición de la resistencia eléctrica surge del hecho de que los elementos resistivos forman parte de prácticamente todos los circuitos y sistemas eléctricos desarrollados en el mundo.

En este trabajo se utilizará un método indirecto: la medición por amperímetro-voltímetro. Este es el único método que se puede emplear para resistencias de gran potencia. Las resistencias que se emplean para limitar la corriente de arranque en los motores de corriente directa y en los grandes motores de inducción, tienen capacidades tan altas como 1000 amperes. El valor de la resistencia está por lo general entre 0.1 y 1 ohm y se debe conocer este valor con una tolerancia del 20 por ciento. Para determinar el valor, se inserta un amperímetro en el cable de corriente que va a la armadura del motor. Se emplea un voltímetro digital para determinar el voltaje a través de la resistencia. A continuación, se encuentra el valor de  $R$  con la ecuación  $R = V/I$ . Se emplea la misma técnica para encontrar la resistencia a tierra de una instalación eléctrica industrial. La resistencia de un electrodo de tierra no puede ser mayor que 25 ohms, según lo especifica el National Electric Code. El valor de la resistencia se determina como se muestra en la figura 10-7.

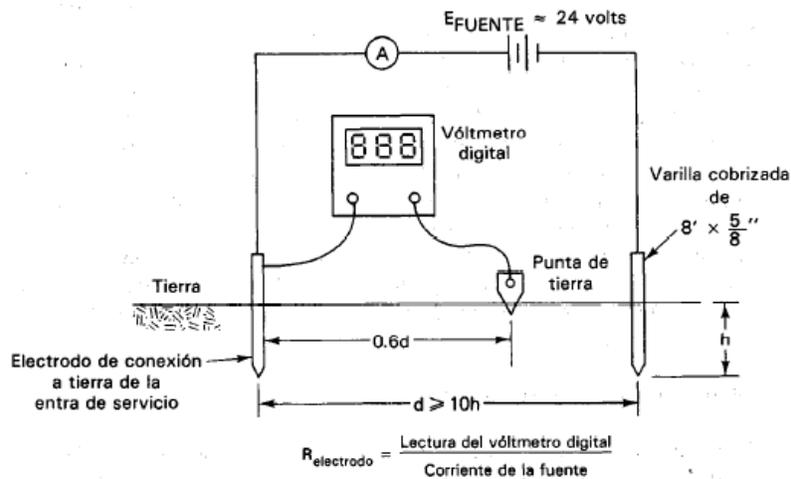


Figura 10-7 Esquema para medir la resistencia del electrodo de tierra.

Existen dos posibles conexiones para determinar el valor de una resistencia: conexión corta y conexión larga (corta o larga hace referencia al lazo voltimétrico, como se verá a continuación).

**3.1.3.5.1 Conexión Corta**

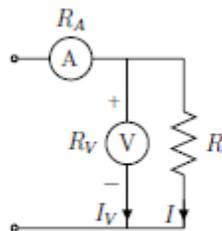


Figura 1. Configuración en conexión corta.

En este caso (Figura 1), la corriente  $I_0$  que se lee del amperímetro es la suma entre la corriente que efectivamente pasa por la resistencia y la que circula por el voltímetro:

$$I_0 = I + I_V$$

El voltímetro mide efectivamente la caída de potencial  $V$  en  $R$ . Por lo tanto, el valor de resistencia que se obtiene a partir de las lecturas de los instrumentos es:

$$R_0 = \frac{V_0}{I_0} = \frac{V}{I + I_V} = \frac{I}{\frac{I}{V} + \frac{I_V}{V}} = \frac{I}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_V}}$$

$$R_0 = \frac{R \cdot R_V}{R + R_V}$$

$$R = \frac{R_0 \cdot R_V}{R_V - R_0}$$

El error metodológico que se comete es

$$e_{\text{met}} = R - R_0$$

### 3.1.3.5.2 Conexión Larga

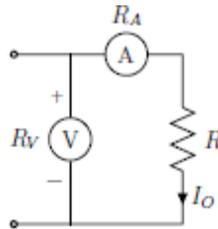


Figura 2: Configuración en Conexión Larga

En esta conexión (Figura 2), la corriente  $I_0$  que lee el instrumento es la que efectivamente circula por la resistencia ( $I$ ) pero la lectura del voltímetro es la suma de la caída de tensión en la resistencia  $V$  y la caída de tensión en el amperímetro  $V_A$ :

$$V_0 = V + V_A$$

Por lo tanto, el valor de resistencia que se obtiene a partir de las lecturas de los instrumentos es:

$$R_0 = \frac{V_0}{I_0} = \frac{V + V_A}{I} = \frac{V}{I} + \frac{V_A}{I} = R + R_A$$

Resulta que el valor observado de resistencia obtenido con este método es:

$$R_0 = R + R_A$$

Esta resistencia es la resistencia equivalente serie de  $R$  y  $R_A$  ya que la tensión medida es la que cae sobre la serie y la corriente medida es la que circula por el equivalente.

Al igual que en el caso anterior, no estamos midiendo el valor de resistencia que realmente nos interesa. Este error se debe a la no idealidad de los instrumentos utilizados.

Sabiendo que el valor real de la resistencia es  $R$ , puede encontrarse su valor a partir de  $R_0$  y conociendo  $R_A$ :

$$R = R_0 - R_A$$

El error metodológico que se comete es:

$$e_{\text{met}} = R - R_0$$

### 3.1.4 Errores en las mediciones

La exactitud de este método depende de la calibración y la estabilidad de los dos medidores y del efecto de carga del voltímetro. Es conveniente emplear un voltímetro digital de alta impedancia de entrada y un amperímetro digital para reducir al mínimo el error en los valores de resistencia medidos.

#### 3.1.4.1 Error metodológico

Como ya se dijo, ambas conexiones tienen asociado un error metodológico. Para ambos, casos, el error metodológico que se comete es

$$e_{\text{met}} = R - R_0$$

Y en forma porcentual

$$e_{\text{met}} = \frac{R - R_0}{R_0} \cdot 100\%$$

El error metodológico puede disminuirse si se elige el método adecuado en función del valor de resistencia. Se dijo ya que la conexión corta mide el paralelo de la resistencia del voltímetro con la resistencia a medir y que la conexión larga mide la serie de la resistencia del amperímetro.

El paralelo de dos resistencias siempre es menor a la menor de las resistencias, por esto, la conexión corta sería conveniente cuando la resistencia a medir sea mucho más pequeña que  $R_V$ . En cambio, la serie de dos resistencias siempre es mayor a la mayor de ellas, en función de esto, la conexión larga sería la apropiada cuando se desee medir una resistencia mucho mayor que  $R_A$ .

Si bien puede minimizarse, el error metodológico dada una conexión determinada para la medición de una resistencia no puede eliminarse. Sin embargo, sí puede corregirse en la expresión final del resultado, esto es, informando  $R$  en lugar de  $R_0$ . En otras palabras, como ya se dijo anteriormente, podemos decir que la resistencia que medimos fue:

$$R = R_0 - R_A \quad \text{si se usó conexión larga}$$

$$R = \frac{R_0 R_V}{R_V - R_0} \quad \text{si se usó conexión corta}$$

### 3.1.5 Puentes de Medición

En la unidad II se dio una mayor explicación del funcionamiento del óhmetro. Es un instrumento sencillo que aplica el voltaje fijo de una batería a través de dos resistencias en serie. Una resistencia es de valor conocido y la otra es la que se va a medir.

Los óhmetros son útiles para efectuar mediciones rápidas de valores de resistencia bajo muchas condiciones y rangos comunes. Se emplean muy frecuentemente en el mantenimiento de equipos electrónicos. Los valores de resistencia que se pueden medir con el óhmetro varían desde  $m\Omega$  hasta  $50 M\Omega$ . Sin embargo, hay algunas limitaciones en su empleo. Debido a que su mejor exactitud es aproximadamente  $\pm 1$  por ciento, no son apropiados para mediciones de gran exactitud. También, se deben seguir ciertas precauciones especiales al emplear los óhmetros para medir circuitos con alta inductancia o capacitancia. Por último como contienen baterías, los óhmetros se deben emplear sólo en circuitos pasivos o en circuitos que no sean dañados por ellas. Los circuitos que tengan fuentes activas pueden contribuir con corrientes que cambien la relación de voltaje a corriente y puedan perjudicar el mecanismo de D'Arsonval del óhmetro. Los circuitos que contienen dispositivos sensibles (como algunos semiconductores y fusibles) podrían quemarse aun por el paso de la pequeña corriente que genera la batería del óhmetro. Por lo tanto, veremos una opción para poder medir resistencias, inductancias y capacidades, denominados puentes de medición.

### 3.1.5.1 Puente de Wheatstone

Un *puente* es el nombre que se usa para denotar una clase especial de circuitos de medición. Estos se emplean con mayor frecuencia para hacer mediciones de resistencia, capacitancia e inductancia. Los puentes se emplean para mediciones de resistencia cuando se necesita una determinación muy exacta de una resistencia en particular. El puente más conocido y que se usa más ampliamente es el puente de Wheatstone. Fue inventado por Samuel Christie, pero Charles Wheatstone lo mejoró hasta el punto de hacerlo producto comercial. Se emplea para medir con exactitud valores de resistencia desde miliohms hasta megohms.

La mayor parte de los puentes de Wheatstone comerciales tienen una exactitud de aproximadamente 0.1 por ciento. Así, los valores de resistencia obtenidos con el puente son mucho más exactos que los obtenidos con el óhmetro o con el voltímetro-amperímetro

#### 3.1.5.1.1 Operación básica

La figura 5-1 esquematiza un puente Wheatstone. El puente tiene cuatro ramas resistivas, junto con una fuente de fem (una batería) y un detector de cero, generalmente un galvanómetro u otro medidor sensible a la corriente. La corriente a través del galvanómetro depende de la diferencia de potencial entre los puntos *c* y *d*. Se dice que el puente está *balanceado* (o en equilibrio) cuando la diferencia de potencial a través del galvanómetro es 0 V, de forma que no hay paso de corriente a través de él. Esta condición se cumple cuando el voltaje del punto *c* al punto *a* es igual que el voltaje del punto *d* al punto *a*; o bien, tomando como referencia la otra terminal de la batería, cuando el voltaje del punto *c* al punto *b* es igual que el voltaje del punto *d* al punto *b*. Por tanto, el puente está en equilibrio cuando

$$I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2 \quad (5-1)$$

Si la corriente del galvanómetro es cero, la siguiente condición también se cumple

$$I_1 = I_3 = \frac{E}{R_1 + R_3} \quad (5-2)$$

y

$$I_2 = I_4 = \frac{E}{R_2 + R_4} \quad (5-3)$$

Al combinar las ecuaciones (5-1), (5-2) y (5-3) y simplificarlas se obtiene

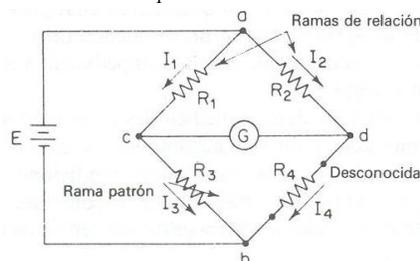
$$\frac{R_1}{R_2 + R_4} = \frac{R_2}{R_2 + R_4} \quad (5-4)$$

De la cual

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (5-5)$$

La ecuación (5-5) es la expresión conocida para el equilibrio del puente Wheatstone. Si tres de las resistencias tienen valores conocidos, la cuarta puede establecerse a partir de la ecuación (5-5). De aquí, si  $R_4$  es la resistencia desconocida, y su valor  $R$  puede expresarse en términos de las resistencias restantes como sigue:

$$R_x = R_3 \frac{R_2}{R_1} \quad (5-6)$$



**Figura 5-1.** Puente empleado para las mediciones de precisión de resistencias en el rango de fracciones de ohms hasta varios megaohms. El selector de relación varía las ramas de relación en pasos de décadas. Los otros cuatro selectores de pasos fijan la resistencia de la rama patrón.

La resistencia  $R_3$  se denomina *rama patrón* del puente, y las resistencias  $R_2$  y  $R_1$ , se les nombra *ramas de relación*.

La medición de la resistencia desconocida  $R_x$  es independiente de las características o de la calibración del galvanómetro detector de cero, puesto que el detector de cero tiene suficiente sensibilidad para indicar la posición de equilibrio del puente con el grado de precisión requerido.

### 3.1.5.1.2 Errores de medición

El puente Wheatstone se emplea ampliamente en las mediciones de precisión de resistencias desde  $1 \Omega$  hasta varios megohms. La principal fuente de errores de medición se encuentra en los errores límites de las tres resistencias conocidas. Otros errores pueden ser los siguientes:

- a) Sensibilidad insuficiente en el detector de cero.
- b) Cambios en la resistencia de las ramas del puente debido a los efectos de calentamiento por la corriente a través de los resistores. El efecto de calentamiento ( $I^2R$ ) por las corrientes en las ramas del puente puede cambiar la resistencia en cuestión. El aumento de temperatura no sólo afecta la resistencia durante la medición, sino que, las corrientes *excesivas* pueden producir un cambio permanente en el valor de la resistencia. Esto puede obviarse y no ser detectado a tiempo y las mediciones subsecuentes resultar erróneas. La disipación de potencia de las ramas del puente se debe calcular previamente, en particular cuando se van a medir valores de resistencia bajos y la corriente debe ser limitada a un valor seguro.
- c) Las fem térmicas en el circuito del puente o en el circuito del galvanómetro pueden causar problemas cuando se miden resistencias de valor bajo. Para prevenirlas se utilizan los galvanómetros más sensibles que algunas veces tiene bobinas y sistemas de suspensión de cobre para evitar el contacto de metales disímiles y la generación de fem térmicas.
- d) Los errores debidos a la resistencia de los contactos y terminales exteriores al circuito puente intervienen en la medición de valores de resistencia muy bajos. Estos errores se pueden reducir mediante el uso de un puente Kelvin (véase sección 5-3).

### 3.1.5.1.3 Circuito equivalente Thévenin

Para saber si el galvanómetro tiene *sensibilidad* para detectar el estado de desequilibrio, es necesario calcular la corriente en el detector. Diferentes galvanómetros además de tener diferentes corrientes por unidad de deflexión (sensibilidad de corriente) también pueden tener una resistencia interna diferente. Es imposible afirmar, sin un cálculo previo, cuál galvanómetro será más sensible en el circuito puente para la condición de desequilibrio. Esta sensibilidad se calcula “analizando” el circuito puente para un *pequeño* desequilibrio. La solución se obtiene al determinar el equivalente Thévenin del puente Wheatstone de la figura 5-1.

Puesto que el parámetro de interés es la corriente a través del galvanómetro, el circuito equivalente Thévenin se determina a partir de las terminales del galvanómetro c y d en la figura 5.1. Se deben realizar dos pasos para encontrar el equivalente de Thévenin: 1) encontrar el *voltaje equivalente* que se presenta en las terminales e y d cuando se desconecta el galvanómetro del circuito; 2) determinar la *resistencia equivalente* a las terminales c y d, con la batería reemplazada por su resistencia interna. Por conveniencia, el circuito de la figura 5-1b se dibuja de nuevo en la figura 5-2a.

El voltaje de Thévenin o de circuito abierto, lo vemos refiriéndonos a la figura 5-2a y se encuentra que

$$E_{cd} = E_{ac} - E_{ad} = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2$$

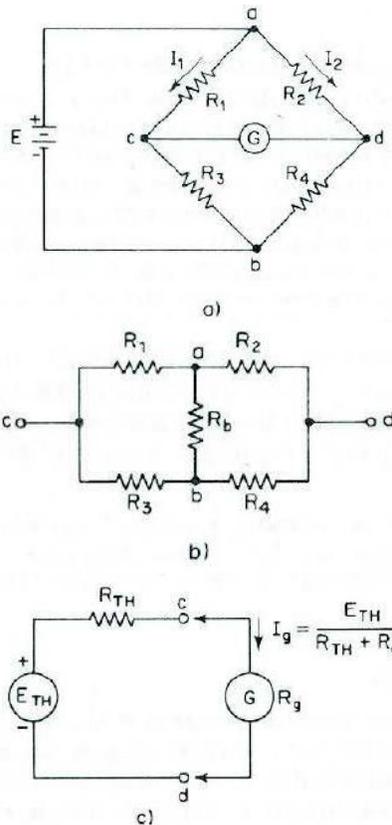


Figura 5-2. Aplicación del teorema de Thévenin al puente Wheatstone. a) Configuración del puente Wheatstone. b) Resistencia de Thévenin desde las terminales c y d. c) Circuito Thévenin completo, con el galvanómetro conectado a las terminales c y d.

Donde

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_3} \quad \text{y} \quad I_2 = \frac{E}{R_2 + R_4}$$

Por consiguiente

$$E_{cd} = E \cdot \left( \frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right) \quad (5-7)$$

Esto es el voltaje del generador Thévenin.

La resistencia del circuito equivalente Thévenin se encuentra observando hacia las terminales c y d y reemplazando la batería por su resistencia interna. El circuito 5-2b representa la resistencia Thévenin. Nótese que la resistencia interna de la batería,  $R_b$ , se incluye en la figura 5-2b. Para convertir este circuito a una forma más conveniente se requiere el uso de la *transformación delta-estrella*. Los lectores interesados en este acercamiento deben consultar obras sobre el análisis de estos circuitos, de dónde este teorema se deriva y cómo se aplica. En la mayoría de los casos dado que la resistencia interna de la batería es muy baja, se puede despreciar lo cual simplifica el circuito de la figura 5-2a para su equivalente Thévenin.

En relación con la figura 5-2b, se observa que entre los puntos a y b existe un cortocircuito cuando la resistencia interna de la batería es 0 Ω. La resistencia de Thévenin, en las terminales c y d, es

$$R_{TH} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 \cdot R_4}{R_2 + R_4} \quad (5-8)$$

El equivalente de Thévenin del circuito del puente Wheatstone se reduce a un generador Thévenin con una fem descrita por la ecuación (5-7) y una resistencia interna dada por la (5-8). Esto se muestra en el circuito de la figura 5-2c.

Cuando el detector de cero se conecta en las terminales de salida del circuito equivalente Thévenin, la corriente del galvanómetro es

$$I_g = \frac{E_{TH}}{R_{TH} + R_g} \quad (5-9)$$

donde  $I_g$  es la corriente del galvanómetro y  $R_g$  su resistencia.

### Ejemplo 5-1

La figura 5-3a ilustra un diagrama esquemático del puente Wheatstone con los valores de cada uno de los elementos del puente. El voltaje de la batería es 5 V y la resistencia interna es despreciable. El galvanómetro tiene una sensibilidad de corriente de 10 mm/ $\mu$ A y una resistencia interna de 100  $\Omega$ . Calcúlese la deflexión del galvanómetro causada por un desequilibrio de 5  $\Omega$  en la rama BC.

**Solución:** El puente se equilibra si la rama BC tiene una resistencia de 2 000  $\Omega$ . El diagrama muestra la rama BC como resistencia de 2 005  $\Omega$ , lo que representa un pequeño desequilibrio (<2000  $\Omega$ ). El primer paso de la solución consiste en encontrar el equivalente de Thévenin del circuito puente en su circuito. Puesto que se desea conocer la corriente en el galvanómetro, el equivalente de Thévenin se determina con respecto a las terminales del galvanómetro B y D. La diferencia de potencial de B o D, sin el galvanómetro en circuito, es el voltaje Thévenin. Con la ecuación (5-7) se tiene

$$E_{TH} = E_{AD} - E_{AB} = 5V \times \left( \frac{100}{100 + 200} - \frac{1000}{1000 + 2005} \right)$$

$$E_{TH} = 2.77 \text{ mV}$$

El segundo paso de la solución es encontrar la resistencia Thévenin en las terminales B y D, y reemplazar la batería por su resistencia interna. Puesto que la resistencia de la batería es 0  $\Omega$  el circuito se representa por la configuración de la figura 5-3b, de la cual deducimos

$$R_{TH} = \left( \frac{100 \times 200}{300} + \frac{1000 \times 2005}{3005} \right) = 734 \Omega$$

El circuito equivalente de Thévenin se muestra en la figura 5-2c. Cuando el galvanómetro se conecta a las terminales de salida del circuito equivalente, la corriente a través del galvanómetro es

$$I_g = \frac{E_{TH}}{R_{TH} + R_g} = \frac{2.77 \text{ mV}}{734 \Omega + 100 \Omega} = 3.32 \mu \text{ A}$$

La deflexión del galvanómetro es

$$d = 3.34 \mu \text{ A} \times \frac{10 \text{ mm}}{\mu \text{ A}} = 33.2 \text{ mm}$$

Es evidente la ayuda que ofrece el equivalente de Thevenin para la solución de circuitos puentes desequilibrados. Si se utiliza otro galvanómetro con diferente sensibilidad de corriente y resistencia interna el cálculo de deflexión es muy simple, como se observa en la figura 5-3c. Por el contrario, si se tiene la sensibilidad del galvanómetro, se puede determinar el voltaje de desequilibrio que se necesita para obtener una deflexión unitaria (por ejemplo, de 1 mm). Este valor es de interés cuando se quiere determinar la sensibilidad de un puente desequilibrado o responder la pregunta “el galvanómetro seleccionado detectaría un pequeño desequilibrio”. El método Thévenin se usa para encontrar la respuesta del galvanómetro, la cual en muchos casos es de interés.

### Ejemplo 5-2

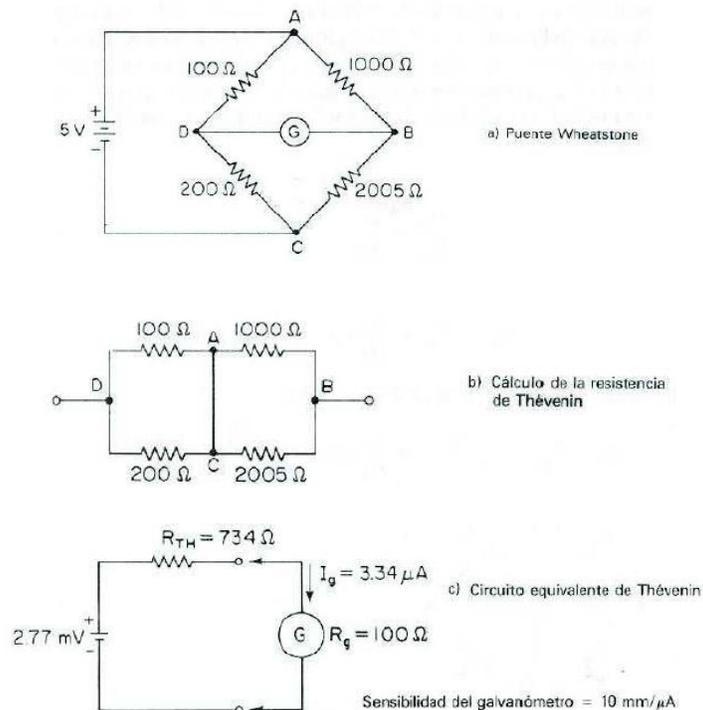
El galvanómetro del ejemplo 5-1 se reemplaza por uno con una resistencia interna de 500  $\Omega$  y sensibilidad de corriente de 1 mm/ $\mu$ A. Considérese que una deflexión de 1 mm se ve en la escala del galvanómetro. Indíquese si este nuevo galvanómetro puede detectar el desequilibrio de 5  $\Omega$  en la rama BC de la figura 5-3a.

**Solución:** Puesto que las constantes del puente no cambian, el circuito equivalente se representa de nuevo por el generador Thévenin de 2.77 mV y una resistencia de Thévenin de 734 Ω. El nuevo galvanómetro se conecta a las terminales de salida, con lo que se tiene una corriente que circula en él.

$$I_g = \frac{E_{TH}}{R_{TH} + R_g} = \frac{2.77 \text{ mV}}{734 \Omega + 500 \Omega} = 2.24 \mu\text{A}$$

La deflexión del galvanómetro es igual a  $2.24 \mu\text{A} \times 1 \text{ mm}/\mu\text{A} = 2.24 \text{ mm}$ ; esto indica que dicho galvanómetro produce una deflexión que se puede observar fácilmente.

El puente Wheatstone está limitado para la medición de resistencias que tienen valores de pocos ohms hasta varios megohms. El límite *superior* se debe a la reducción de sensibilidad del desequilibrio, ocasionada por los elevados valores de las resistencias, ya que en este caso la resistencia equivalente a Thevenin de la figura 5-3c llega a ser alta, lo que reduce la corriente del galvanómetro. El límite *inferior* lo determina



**Figura 5.3. Cálculo de la deflexión del galvanómetro originado por un pequeño desequilibrio en la rama BC, empleando el circuito Thévenin simplificado.**

la resistencia de los alambres de conexión y la resistencia de los contactos de los bornes de conexión. La resistencia de los alambres se puede calcular o medir, *modificar* el resultado final, pero la resistencia de los contactos es difícil de calcular y medir. Para mediciones de baja resistencia se prefiere el puente Kelvin.

### Ejemplo 10-3

Un puente de Wheatstone como el que se muestra en la figura 10-10 tiene  $R_1 = 100 \Omega$ ,  $R_2 = 40 \Omega$ ,  $R_3 = 500 \Omega$ ,  $V_0 = 10 \text{ V}$ ,  $R_m$  (la resistencia del galvanómetro) =  $600 \Omega$ . Calcúlese a) el valor de  $R_x$  cuando el puente está balanceado y b), si el valor de  $R_x$  cambia en  $+2 \Omega$  en relación de su valor en equilibrio, calcúlese la corriente  $I_m$  que pasará por el medidor.

### Solución.

a) Con la ecuación (10-12), que describe un puente en equilibrio,

$$R_x = R_3 \frac{R_2}{R_1} = 500 \frac{40}{100} = 200 \Omega$$

b) Si el valor de  $R_x$  cambia a  $202 \Omega$ , se encuentra el valor de  $I_m$  mediante la ecuación (10-17). Sin embargo, se deben calcular primero  $V_{TH}$  y  $R_{TH}$ . Para ello se emplean las ecuaciones (10-13) y (10-14).

$$V_{TH} = V_0 \frac{R_3 \Delta R}{2R_3 R_x + R_3^2 + R_x^2}$$

$$V_{TH} = 10 \frac{500 \times 2}{(2 \times 500 \times 202) + (500)^2 + (202)^2}$$

$$V_{TH} = 0.02 \text{ V}$$

y

$$\begin{aligned} R_{TH} &= (R_1 \parallel R_2) + (R_3 \parallel R_x) \\ &= (100 \parallel 40) + (500 \parallel 202) \\ &= 171 \Omega \end{aligned}$$

Entonces  $I_m$  se encuentra mediante la ecuación (10-17):

$$I_m = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_m} = \frac{0.02}{171 + 600} = 26 \mu\text{A}$$

### 3.1.5.2 Puente Kelvin.

El puente Kelvin es una modificación del Wheatstone y proporciona un gran incremento en la *exactitud* de las mediciones de *resistencias de valor bajo*, por lo general inferiores a  $1 \Omega$ . Considérese el circuito puente de la figura 5-4, donde  $R_y$  representa la resistencia del alambre de conexión de  $R_3$  a  $R_x$ . Son posibles dos conexiones del galvanómetro, en el punto  $m$  o en el punto  $n$ . Cuando el galvanómetro se conecta en el punto  $m$ , la resistencia  $R_y$  del alambre de conexión se suma a la desconocida  $R_x$ , resultando una indicación por arriba de  $R_x$ . Cuando la conexión se hace en el punto  $n$ ,  $R_y$  se suma a la rama del puente  $R_x$  y el resultado de la medición de  $R_x$  será menor que el que debería ser, porque el valor real de  $R_x$  es más alto que su valor nominal debido a la resistencia  $R_y$ . Si el galvanómetro se conecta en el punto  $p$ , entre  $m$  y  $n$ , de tal forma que la razón de la resistencia de  $n$  a  $p$  y  $m$  a  $p$  iguale la razón de los resistores  $R_1$  y  $R_2$ , entonces

$$\frac{R_{np}}{R_{mp}} = \frac{R_1}{R_2} \quad (5-10)$$

La ecuación de equilibrio para el puente da:

$$R_x + R_{np} = \frac{R_1}{R_2} (R_3 + R_{mp}) \quad (5-11)$$

Al sustituir la ecuación (5-10) en la (5-11), se tiene

$$R_x + \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot R_y = \frac{R_1}{R_2} \left[ R_3 + \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) R_y \right] \quad (5-12)$$

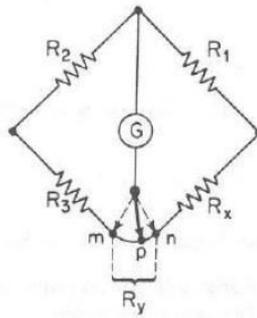


Figura 5-4. Circuito del puente Wheatstone; muestra la resistencia  $R_y$  del conductor del punto  $m$  al punto  $n$ .

lo cual se reduce a

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3 \quad (5-13)$$

La ecuación (5-13) es la ecuación de equilibrio desarrollada para el puente Wheatstone e indica que el efecto de la resistencia del alambre de conexión del punto  $m$  al punto  $n$  se elimina conectando el galvanómetro en la posición intermedia  $p$ .

Esta es la base para la construcción del puente doble Kelvin, conocido como *puente Kelvin*.

### 3.1.5.2.1 Puente doble Kelvin

El término puente *doble* se usa debido a que el circuito contiene un segundo juego de ramas de relación (figura 5-5). Este segundo conjunto de ramas, marcadas  $a$  y  $b$  en el diagrama, se conectan al galvanómetro en el punto  $p$  con el potencial apropiado entre  $m$  y  $n$ , lo que elimina el efecto de la resistencia  $R_y$ . Una condición establecida inicialmente es que la relación de la resistencia de  $a$  y  $b$  debe ser la misma que la relación de  $R_1$  y  $R_2$ .

La indicación del galvanómetro será cero cuando el potencial en  $k$  sea igual al potencial en  $p$ , o cuando

$E_{kl} = E_{Imp}$ , donde

$$E_{kl} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \left[ R_3 + R_x + \frac{(a+b) R_y}{a+b+R_y} \right] \quad (5-14)$$

Y

$$E_{Imp} = I \cdot \left\{ R_3 + \frac{b}{a+b} \left[ \frac{(a+b) R_y}{a+b+R_y} \right] \right\} \quad (5-15)$$

Resolviendo  $R_x$  e igualando  $E_{kl}$  y  $E_{Imp}$  de la siguiente manera:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} I \cdot \left[ R_3 + R_x + \frac{(a+b) R_y}{a+b+R_y} \right] = I \cdot \left[ R_3 + \frac{b}{a+b} \cdot \frac{(a+b) R_y}{a+b+R_y} \right]$$

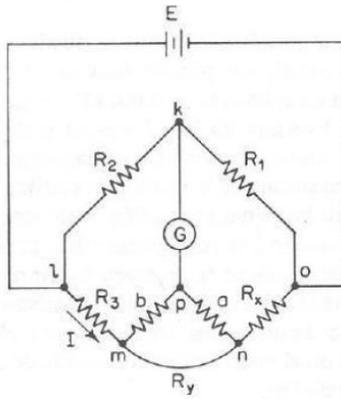


Figura 5-5. Circuito básico del puente doble de Kelvin.

O al simplificar se obtiene

$$R_3 + R_x + \frac{(a+b)R_y}{a+b+R_y} = \frac{R_1+R_2}{R_2} \left[ R_3 + \frac{b \cdot R_y}{a+b+R_y} \right]$$

Y la expansión del miembro del lado derecho da

$$R_3 + R_x + \frac{(a+b)R_y}{a+b+R_y} = \frac{R_1 R_3}{R_2} + R_3 + \frac{R_1+R_2}{R_2} \left[ \frac{b \cdot R_y}{a+b+R_y} \right]$$

La solución de  $R_x$  a

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2} + \frac{R_1}{R_2} \left[ \frac{b \cdot R_y}{a+b+R_y} \right] + \frac{b \cdot R_y}{a+b+R_y} - \frac{(a+b) \cdot R_y}{a+b+R_y}$$

De modo que

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2} + \frac{b \cdot R_y}{a+b+R_y} \left( \frac{R_1}{R_2} - \frac{a}{b} \right) \quad (5-16)$$

Al aplicar la condición establecida inicialmente de que  $a/b = R_1/R_2$ , la ecuación (5-16) se reduce a la relación bien conocida

$$R_x = R_3 \frac{R_1}{R_2} \quad (5-17)$$

La ecuación (5-17) es la ecuación de trabajo para el puente Kelvin. Indica que la resistencia  $R_y$ , no tiene efecto en la medición, siempre y cuando los dos conjuntos de ramas de relación tengan igual relación de resistencia.

El puente Kelvin se utiliza para medir resistencias muy bajas, de aproximadamente  $1 \Omega$  hasta  $0.00001 \Omega$ . La figura 5-6 muestra el diagrama del circuito simplificado de un puente Kelvin comercial que mide resistencias de  $10 \Omega$  a  $0.00001 \Omega$ . En este puente, la resistencia  $R_3$  de la ecuación (5-17) se representa por una resistencia patrón variable en la figura 5-6. Las ramas de relación ( $R_1$  y  $R_2$ ) se pueden colocar mediante una década de resistencias.

Las caídas de potencial de contacto en el circuito de medición pueden ocasionar grandes errores; para reducir este efecto la resistencia patrón consiste de 9 pasos de  $0.001 \Omega$  cada uno, más una barra de manganina calibrada de  $0.0011 \Omega$  con un contacto deslizante. La resistencia total de la rama  $R_3$  suma  $0.0101 \Omega$  y es variable en pasos de  $0.001 \Omega$ , más fracciones de  $0.0011 \Omega$  del contacto deslizante. Cuando ambos contactos se escogen para seleccionar el valor conveniente de la resistencia patrón, cambia la caída de voltaje entre los puntos de conexión de las ramas de relación. Este arreglo coloca toda resistencia de contacto en serie con los valores de resistencia relativamente altos de las ramas de relación, y la resistencia de contacto tiene efectos despreciables.

La razón  $R_1/R_2$  se debe seleccionar de tal forma que una parte relativamente alta de la resistencia patrón se use en el circuito de medición. En esta forma el valor de la resistencia desconocida  $R_x$  se determina con el mayor número posible de cifras significativas, y mejora la exactitud de la medición.

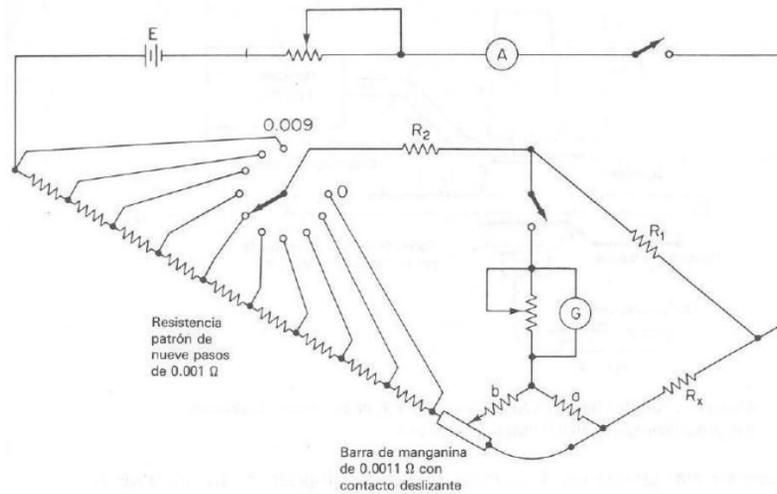


Figura 5-6. Circuito simplificado de un puente doble de Kelvin, utilizado para la medición de valores de resistencias muy bajos.

### 3.1.5.2.2 Resistencia de tres terminales

En el esquema de la figura 5-8 la protección alrededor de  $R_x$  se indica por medio de un círculo pequeño alrededor de la terminal, no toca ninguna parte del circuito puente y se conecta directamente a la terminal de la batería. Este concepto del alambre de protección en el borne de conexión se aplica a cualquier parte interna del circuito puente donde las fugas afectan la medición; en este sentido se habla de puente Wheatstone con protección.

Para evitar los efectos de la pérdida de corriente externa al circuito del puente, la unión de las ramas de relación  $R_A$  y  $R_B$  normalmente se toma como una terminal de protección separada del panel frontal del instrumento. Esta terminal de protección se puede

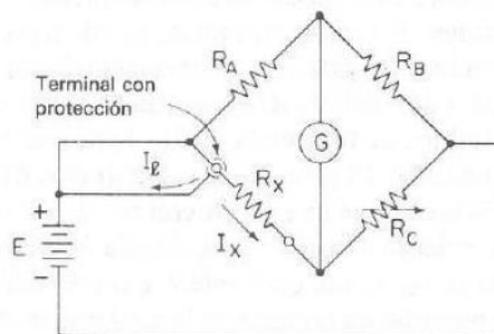
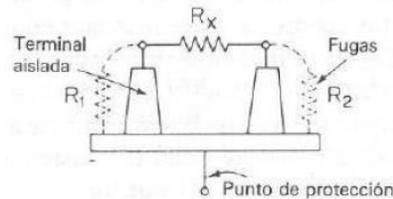


Figura 5-8. La terminal con protección hace retornar la corriente de fuga a la batería.

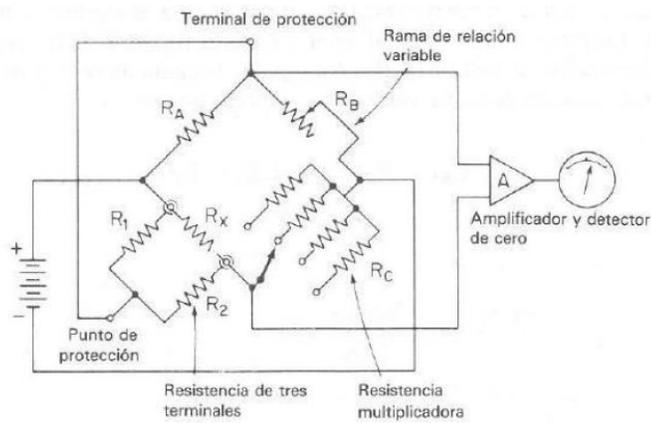
conectar a la *resistencia de tres terminales* como se muestra en la figura 5-9a. La alta resistencia se monta sobre dos terminales aisladas sujetas a una placa metálica. Las dos terminales principales de la resistencia se conectan a las terminales  $R_x$  del puente. La tercera terminal de la resistencia es el punto común de las resistencias  $R_1$  y  $R_2$ , la cual representa el camino de fuga desde las terminales principales a lo largo de sus partes aislantes hasta la placa metálica o de protección. La protección se conecta a la terminal de protección ubicada en el panel frontal del puente, como se indica en el esquema de la figura 5-9. Esta conexión coloca a

$R_1$  en paralelo con la rama de relación de  $R_A$ , pero puesto que  $R_1$  es mayor que  $R_A$ , su efecto de desviación es despreciable. Similarmente, la resistencia de fuga  $R_2$  está en paralelo con el galvanómetro, pero la resistencia de  $R_2$  es mayor que la del galvanómetro, de manera que el único efecto es una pequeña reducción en la sensibilidad del galvanómetro. Los efectos de los caminos de fuga externos se eliminan con un circuito de protección con la resistencia de tres terminales.

Si no se usa el circuito de protección, las resistencias de fuga  $R_1$  y  $R_2$ , estarían directamente a través de  $R_x$  y el valor medido de  $R_x$  tendría un error considerable.



a) Resistencia de tres terminales



b) Resistencia de las terminales

**Figura 5-9. Resistencia de tres terminales, conectada a un puente de megaohms de alto voltaje con protección.**

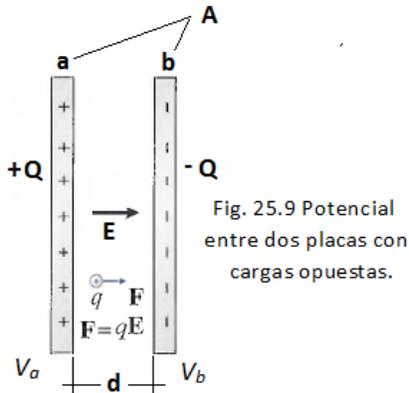
Considere que la resistencia desconocida es de  $100 \text{ M}\Omega$  y que la resistencia de fuga de cada terminal de la protección es  $100 \text{ M}\Omega$  también, la resistencia  $R_x$  mediría  $67 \text{ M}\Omega$ , es decir un error de cerca de 33%.

### 3.1.2. Medición de capacitancia e inductancia.

#### 3.1.2.1 Medición de capacitancia en c.d.

Un *condensador* es un dispositivo electrostático que consta de dos placas conductoras (**a** y **b**) de área  $A$  separados por una distancia  $d$  (véase la figura 25.9). Si se colocan sobre las placas conductoras cargas iguales y opuestas, habrá un campo eléctrico  $E$  uniforme entre ellas. La expresión para calcular el campo eléctrico en términos de la cantidad de carga sobre las placas, es

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot A} \quad (10)$$



Supongamos que las placas están separadas por una distancia  $d$ . Una carga  $q$  situada en la región comprendida entre las placas  $A$  y  $B$  experimentará una fuerza dada por

$$F = q \cdot E$$

El trabajo realizado por esta fuerza para mover la carga  $q$  de la placa  $A$  a la placa  $B$  está dado por

$$F \cdot d = q \cdot E \cdot d = W_{ab} \quad (11)$$

Pero este trabajo también es igual al producto de la carga  $q$  por la diferencia de potencial  $V_a - V_b = V_{ab}$  entre las dos placas, así que podemos escribir

$$W_{ab} = q \cdot V_{ab} \quad (12)$$

Por lo que igualando las expresiones (11) y (12)

$$q \cdot E \cdot d = q \cdot V_{ab}$$

$$E = \frac{V_{ab}}{d} \quad (13)$$

Igualando (10) y (13)

$$Q = \epsilon_0 \frac{A}{d} \cdot V_{ab}$$

Se dice que el aumento de la carga  $Q$  es directamente proporcional al incremento del potencial  $V_{ab}$ .

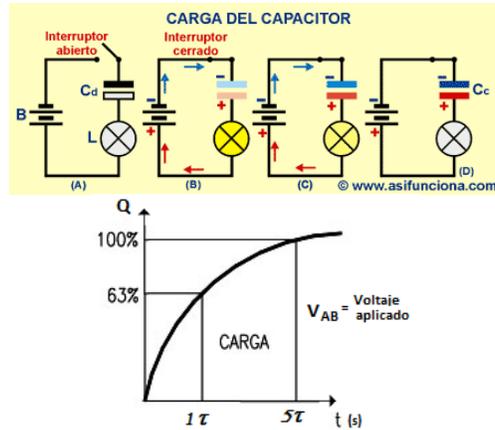
Por tanto, la razón de la cantidad de carga  $Q$  almacenada por las placas al potencial eléctrico  $V_{ab}$  aplicado, será constante. Esa razón refleja la capacidad de las placas conductoras para almacenar carga y se le llama su *capacitancia*  $C$ .

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

$$Q = C \cdot V_{ab}$$

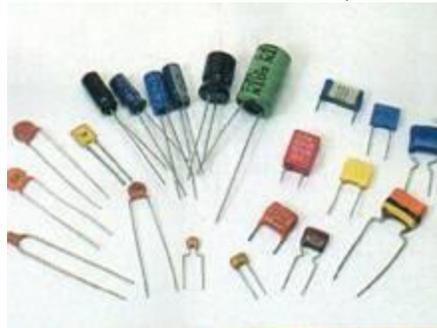
Esta última expresión me dice que la carga del condensador será directamente proporcional a su capacidad y a la diferencia de potencial aplicado. Si a un condensador descargado ( $Q = 0$  C), se le aplica un voltaje, el

condensador ira adquiriendo carga eléctrica hasta que la diferencia de potencial entre sus placas iguale al voltaje aplicado.

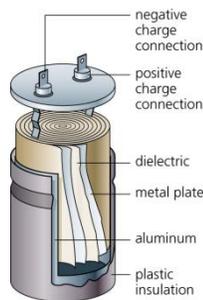


### 3.1.2.1.1 Tipos de condensadores.

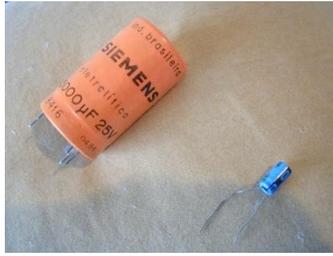
Algunos de ellos son: Existen muchísimos tipos de condensadores, que poseen propiedades y características diversas, tal que resulta demasiado difícil hacer una clasificación de ellos. Se puede cubrir, de manera general, los tipos que se pueden encontrar en circuitos eléctricos por medio de la siguiente referencia:



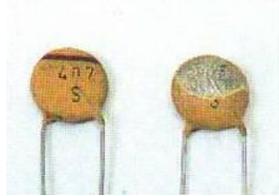
1. **Capacitor eléctrico de aluminio:** este posee una capacitancia por volumen muy elevada y además, son muy económicos, es por esto que son sumamente utilizados. Estos contienen hojas metálicas que poseen un electrolito que puede ser seco, pastoso o acuoso. Los capacitores eléctricos de aluminio se pueden encontrar no polarizados y polarizados.



2. **Capacitor eléctrico de tantalio:** si bien estos son más caros que los anteriores, se destacan por poseer una mayor confiabilidad y flexibilidad. Dentro de este tipo de capacitores existen tres clases: **capacitores de hojas metálicas, capacitores de tantalio sólido y capacitores de tantalio.**



3. **Capacitores eléctricos de cerámica:** estos se destacan por ser económicos y de reducido tamaño. Además, poseen un gran intervalo de capacitancia. El material dieléctrico que se utiliza en estos capacitores puede ser titanato de calcio, de bario o bien, dióxido de titanio a los que se le agregan otros aditivos. Los capacitores eléctricos de cerámica adquieren forma de disco o tubular.



4. **Capacitores eléctricos de plástico o papel:** estos pueden estar hechos con plástico, papel, o la suma de los dos y se los puede utilizar en aplicaciones como acoplamiento, filtrado, cronometraje, suspensión de ruidos y otras. Una propiedad que poseen estos capacitores es que las películas metálicas se autorreparan. También son muy estables, resistentes al aislamiento y pueden funcionar a temperaturas muy elevadas.



5. **Capacitores de vidrio y mica:** estos son utilizados cuando se precisa muy buena estabilidad y una carga eléctrica alta. Se caracterizan por poder operar a frecuencias muy altas y tener gran estabilidad en relación a la temperatura. Estos capacitadores se encuentran en distintos tamaños.

### 3.1.2.1.2 Identificación de los condensadores.

Al igual que ocurre con las resistencias, en muchos condensadores se indica su valor a través de unas bandas coloreadas o puntos de color.

El orden de lectura de las franjas varía de un condensador a otro. Esto indica que la primera franja no tiene por qué ser la primera cifra, sino que puede indicar la tolerancia. Como la tendencia es a indicar los valores de forma numérica, no haremos especial hincapié en este apartado, puesto que para su identificación hay que consultar las tablas de fabricantes. Cuando vienen tres cifras impresas, casi siempre se hace referencia a la unidad de picofaradio.

CÓDIGO DE COLORES PARA CONDENSADORES							CONDENSADORES
A	B	C	D	T	TC	V	
1ª cifra	2ª cifra	3ª cifra	Multiplicador	Tolerancia	Coef. de temperatura	Tensión	
0	0	0	x 1	± 20%	0	100 V	
1	1	1	x 10	± 10%	-33 x 10^B	250 V	
2	2	2	x 100	± 5%	-75 x 10^B	400 V	
3	3	3	x 1.000	± 2%	-150 x 10^B	630 V	
4	4	4	x 10.000	± 1%	-220 x 10^B		
5	5	5	x 100.000	± 1 pF	-330 x 10^B		
6	6	6	x 1.000.000	± 0,5 pF	-470 x 10^B		
7	7	7	≡ x 0,1	± 0,25 pF	-750 x 10^B		
8	8	8	≡ x 0,01	± 0,1 pF	150±-1500 x 10^B		
9	9	9			100±-750 x 10^B		

Forma	Valor	Tolerancia	Coef. de temperatura
	10k pF	±10%	100 v
	8 k 8 pF	±20%	450 v
	270 pF	±5%	
	330 x 10^7	±2%	
	47k	±20%	
	5 k 9	±30%	
	5 k 9	±30%	
	1000 pF	±5%	

### 3.1.2.1.3 Medición de capacitancia en c.d. con un multímetro digital.

El multímetro puede determinar la capacitancia cargando un capacitor con una corriente conocida y posteriormente mide la tensión resultante para calcularla.<sup>5</sup>

#### Pasos para medir capacitancia

1. Usa tu **multímetro digital** (DMM) para asegurarte que toda la alimentación del circuito esté desconectada. Si el capacitor está usando un circuito CA, configura el multímetro para una medición de tensión CA. Si está usando un circuito CD configura el multímetro para medir tensión CD.
2. Inspecciona visualmente el capacitor. Si ves fugas, grietas, protuberancias u otros signos de deterioro, reemplaza el capacitor.
3. Gira la perilla a modo de medición de capacitor (3). El símbolo normalmente está acompañado de otra función. Adicionalmente a esto suele ser necesario presionar un botón para activar la medición. (Consulta el manual de usuario de tu multímetro para más información).
4. Para una medición correcta, el capacitor debe ser removido del circuito. Descarga el capacitor como se mencionó anteriormente.



<sup>5</sup> Un capacitor almacena carga eléctrica y puede permanecer energizado incluso después de desconectarlo, es por eso se recomienda descargar el capacitor conectando un resistor a través de sus terminales (conecta una resistencia de 20 Ω / 5 W, aproximadamente). Usa el multímetro para confirmar que el capacitor está completamente descargado.

**Nota:** Algunos multímetros ofrecen un modo relativo (REL). Cuando mides valores de capacitancia bajos, puedes usar el modo relativo para eliminar la capacitancia de los cables de prueba. Para poner un multímetro en modo relativo para capacitancia, deja los cables de prueba abiertos y presiona el botón REL, esto elimina el valor residual de capacitancia de los cables de prueba.

5. Conecta los cables de prueba en las terminales del capacitor. Mantén los cables de prueba conectados por algunos segundos para dejar que el multímetro seleccione de manera automática el intervalo correcto.

6. Lee la medición en la pantalla. Si el valor de capacitancia se encuentra dentro del intervalo, el multímetro mostrará el valor del capacitor. Si se muestra OL a) El valor del capacitor es más alto que el intervalo de medición, o b) El capacitor está dañado.

#### **No se cuenta con un multímetro digital con función de medir capacidad.**

Medir capacitancia únicamente se podrá encontrar en un multímetro digital que cuente con esa función. Por lo contrario, lo que sí se puede hacer es probar si el capacitor funciona.

Para realizar la prueba del capacitor, el multímetro debe colocarse en óhmetro en una escala baja (por ejemplo, para medir 200 ohms) y descargar el capacitor.

Primero, se colocan las puntas del multímetro en las terminales del capacitor (no importan su polaridad), la aguja del multímetro deberá subir rápidamente y después bajar. Después, intercambia las puntas del multímetro para repetir la medición con la polaridad inversa, la aguja deberá subir y bajar nuevamente; si es así el capacitor funciona correctamente.

#### **3.1.2.1.4 Visión general de la medición de capacitancia**

Uno de los usos más prácticos de la función de capacitancia de un multímetro digital es la solución de problemas en motores monofásicos. Que no arranque de un motor monofásico es síntoma de un capacitor defectuoso.

Los capacitores de corrección del factor de potencia trifásicos normalmente tienen un fusible protegido, si uno o más de estos capacitores fallan se tendrá ineficiencia en el sistema, además se aumentará el costo las facturas por pago de servicios eléctricos.

En caso de que se queme un fusible con capacitor, debe medirse capacitor verificarse que se encuentre dentro de los intervalos marcados en el capacitor.

#### **3.1.2.2 Medición de Inductancia.**

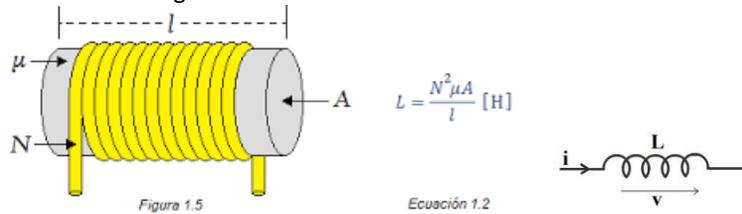
**Inductancia** se define como la oposición de un elemento conductor (una bobina) a cambios en la corriente que circula a través de ella. También se puede definir como la relación que hay entre el flujo magnético ( $\Phi$ ) y la corriente y que fluye a través de una bobina.

El término "inductancia" fue empleado por primera vez por Oliver Heaviside, mientras que el símbolo  $L$ , con el cual se representa en circuitos eléctricos, se utiliza en honor al físico Heinrich Lenz. Matemáticamente se define como

$$L = \Phi / I$$

Donde:  $\Phi$  es el Flujo magnético, y la letra  $I$  representa la intensidad de corriente eléctrica. Básicamente, todo inductor consiste en un arrollamiento de hilo conductor. La inductancia resultante es directamente

proporcional al número y diámetro de las espiras y a la permeabilidad del interior del arrollamiento, y es inversamente proporcional a la longitud de la bobina.



El valor de la inductancia viene dado exclusivamente por las características de la bobina y por la permeabilidad magnética del medio en el que se localiza, cualquier conductor tiene inductancia, incluso cuando el conductor no forma una bobina. La inductancia de una pequeña longitud de hilo recto es pequeña, pero no despreciable si la corriente a través de él cambia rápidamente, la tensión inducida puede ser apreciable. Este puede ser el caso de incluso unas pocas pulgadas de hilo cuando circula una corriente de 100 MHz o más. Sin embargo, a frecuencias mucho más bajas la inductancia del mismo hilo puede ser despreciable, ya que la tensión inducida será despreciablemente pequeña. Los valores de inductancia prácticos van de unos décimos de mH para un conductor de 1 milímetro de largo hasta varias decenas de miles de Henrios para bobinas hechas de miles de vueltas alrededor de núcleos ferromagnéticos.

### 3.1.2.2.1 Unidad de medida de la inductancia.

Se mide en henrios, ya que de acuerdo con el Sistema Internacional de Medidas, el flujo se expresa en Weber y la intensidad en Amperio, pero se utiliza más los submúltiplos como el milihenrio (mH), que equivale a una milésima parte de un henrio, y el microhenrio ( $\mu\text{H}$ ) que corresponde a una millonésima parte de un henrio.

### 3.1.2.2.2 Clasificación

#### Según el núcleo o soporte

**Núcleo de aire:** el devanado se realiza sobre un soporte de material no magnético (fibra, plástico.). En los casos donde no se utiliza soporte, la bobina queda conformada sólo debido a la rigidez mecánica del conductor.

**Núcleo de hierro:** como tiene mayor permeabilidad que el aire (10 a 100), aumenta el valor de la inductancia. Sin embargo, sólo se emplea en bajas frecuencias porque a altas frecuencias las pérdidas son elevadas. Aplicaciones: fuentes de alimentación y amplificadores de audio.

**Núcleo de ferrita:** las ferritas son óxidos de metales magnéticos, de alta permeabilidad (10 a 10000) que además son dieléctricos. Existe una gran variedad en el mercado en función de la frecuencia de trabajo.

#### Según la frecuencia de la corriente aplicada

- Alta frecuencia
- Baja frecuencia

#### Según el recubrimiento

- Plástico
- Resina
- metal (apantalladas)

#### Según la característica de su valor

Fijos  
Ajustables

### Según el tipo de montaje

Inserción  
SMD (Por las siglas en inglés, dispositivos de montaje superficial)

#### 3.1.2.2.3 Codificación

Los inductores moldeados suelen presentar un sistema de Código de colores similar al de los resistores. De acuerdo con el estándar EIA (Electronic Industries Association), si una de las bandas que corresponden a las cifras significativas es dorada, ésta representa al punto decimal y la banda que antes actuaba como multiplicador pasa a ser ahora otra cifra significativa.

#### 3.1.2.2.4 Valores Estándares

Los valores más comunes de inductores moldeados corresponden a la serie E12 (10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82).

#### 3.1.2.2.5 Criterios de Selección

A continuación se enumeran las características técnicas que hay que tener en cuenta a la hora de seleccionar los inductores para determinada aplicación.

Valor inductivo  
Tolerancia  
Tamaño y requisitos de montaje  
Margen de frecuencias o Frecuencia central de trabajo  
Capacidad parásita entre bornes: tiene influencia al trabajar en alta frecuencia porque puede hacer que el inductor se comporte como un cortocircuito.  
Resistencia de aislamiento entre espiras: si se supera el Voltaje máximo entre terminales, se perfora el aislante del hilo conductor.  
Corriente admisible por el hilo conductor  
Q (factor de calidad o de mérito): se define como la relación entre la Reactancia inductiva y la Resistencia óhmica del inductor ( $Q = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{L}{R}$ ). Es deseable que la resistencia sea baja y por ende que el Q sea alto. Según la fórmula, Q tendría que aumentar con la frecuencia, sin embargo no es así porque también aumenta la resistencia. Los fabricantes informan sobre el Q del inductor a la frecuencia de trabajo o bien presentan curvas de Q(f). Los Q de inductores para aplicaciones de radiofrecuencia oscilan entre 50 y 200.

#### 3.1.2.2.6 Cálculos de inductancia

La inductancia aproximada de una bobina puede ser calculada con la fórmula simplificada:

$$L = \frac{d^2 \cdot n^2}{18 \cdot d} + 40 \cdot l \quad (\text{microH})$$

Donde:

L = inductancia en microhenrios  
d = diámetro de la bobina en pulgadas  
l = longitud de la bobina en pulgadas  
n = número de espiras

### 3.1.3 Mediciones con puentes.

#### 3.1.3.1 Intensidad de corriente y tensión senoidales

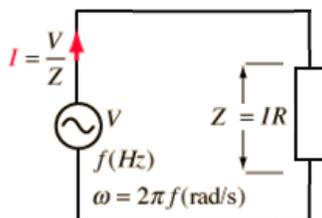
El análisis de circuitos de c.a. tiene una gran importancia porque las tensiones que suministran los generadores son de ese tipo, muy aproximadamente, son funciones senoidales dependientes del tiempo.

**Tensión en bornes de un elemento puro si la corriente es senoidal**

Elemento	Tensión si $i$ es general	Tensión si $i = I_m \text{ sen } \omega t$	Tensión si $i = I_m \text{ cos } \omega t$
Resistencia $R$	$v_R = Ri$	$v_R = RI_m \text{ sen } \omega t$	$v_R = RI_m \text{ cos } \omega t$
Autoinducción $L$	$v_L = L \frac{di}{dt}$	$v_L = \omega LI_m \text{ cos } \omega t$	$v_L = \omega LI_m (-\text{sen } \omega t)$
Capacidad $C$	$v_C = \frac{1}{C} \int i dt$	$v_C = \frac{I_m}{\omega C} (-\text{cos } \omega t)$	$v_C = \frac{I_m}{\omega C} \text{ sen } \omega t$

#### 3.1.3.2 Impedancia

Un parámetro que surge del análisis de los circuitos de c.a., es la impedancia ( $Z$ ), que es una medida de la oposición que presenta un circuito al paso de una corriente de c.a., cuando se aplica una tensión de c.a

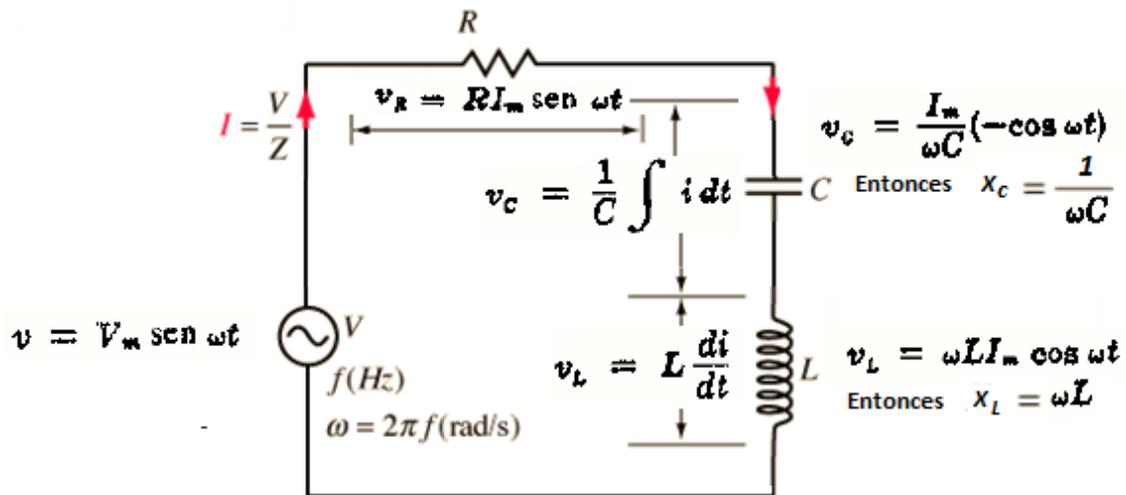


La impedancia de un elemento aislado, o de una rama de varios elementos, o de un circuito completo, es la relación entre la tensión aplicada y la intensidad de corriente que circula

$$\text{Impedancia} = \frac{\text{Función de tensión}}{\text{Función de intensidad}}$$

La impedancia es un concepto generalizado de resistencia. El concepto de impedancia permite generalizar la ley de Ohm en el estudio de circuitos en corriente alterna (CA). La ley de Ohm de corriente alterna que indica:

$$I = \frac{V}{Z}$$



En un circuito eléctrico construido por los tres elementos elementales, la impedancia esta  $Z$  está formada por

$$\bar{Z} = R + \bar{X}$$

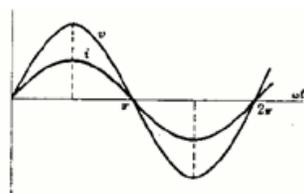
Donde  $X$  es la que se le denomina parte reactiva, que dependerá de los valores capacitivos e inductivos y de la frecuencia del voltaje aplicado.

Si las tensiones e intensidades de corriente son senoidales, esta relación tiene un módulo y un argumento. El valor del modulo, es

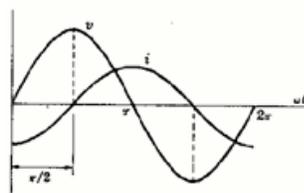
$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

### 3.1.3.3 Ángulo de fase.

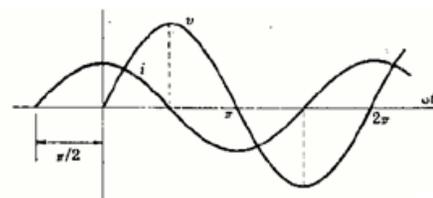
El ángulo entre la tensión  $v$  y la intensidad de corriente  $i$  se llama argumento, ángulo de fase o, simplemente, fase. Si tanto la tensión como la intensidad de corriente son funciones senoidales del tiempo y se representan gráficamente con la misma escala de tiempos, aparece un desplazamiento relativo entre ambas magnitudes que solo es NULO en el caso de tratarse de un elemento resistivo puro. Dicho desplazamiento es el ángulo de fase y nunca puede ser superior a  $90^\circ$  o  $\pi/2$  radianes. Por convenio, al hablar del ángulo de fase se considera «el que forma la intensidad de corriente  $i$  con la tensión». En un condensador, por ejemplo,  $i$  adelanta  $90^\circ$  o  $\pi/2$  radianes a  $v$ ; en un circuito serie  $RL$ , con  $R$  igual a  $\omega L$ ,  $v$  adelanta  $45^\circ$  o  $\pi/4$  a  $i$  (o bien  $i$  está retrasada  $\pi/4$  respecto de  $v$ ); en una resistencia pura,  $i$  está en fase con  $v$ ; etc. Las representaciones de las figuras siguientes aclaran los conceptos de impedancia y ángulo de fase.



**Resistencia R.**



**Autoinducción L.**



**Capacidad C.**

#### Ejemplo.

Por un circuito serie formado por un elemento resistivo de resistencia  $R$  ohmios y un condensador de capacidad  $C$  faradios, como se indica en la Fig. 3-9(a), circula una corriente de intensidad  $i = I_m \cdot \cos(\omega t)$  amperios. Expresar la tensión total aplicada  $v_T$  mediante una función senoidal.

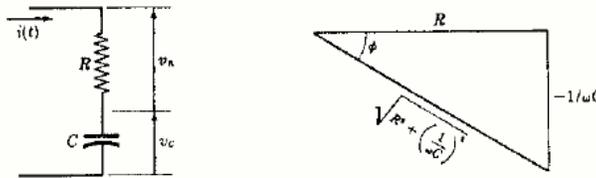


Fig. 3-9

$$v_T = v_R + v_C = RI_m \cos \omega t + (1/\omega C)I_m \sin \omega t$$

Expresando  $v_T$  por un único término coseno de amplitud  $A$  y fase  $\phi$ ,

$$v_T = A \cos(\omega t + \phi) = A \cos \omega t \cos \phi - A \sin \omega t \sin \phi$$

Igualando los coeficientes de  $\sin \omega t$  y  $\cos \omega t$  en (1) y (2) resulta,

$$RI_m = A \cos \phi, \quad (1/\omega C)I_m = -A \sin \phi$$

$$\text{Ahora bien, } \operatorname{tg} \phi = \frac{\sin \phi}{\cos \phi} = -\frac{1}{\omega CR}, \quad \cos \phi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}}, \quad A = \sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2} I_m, \quad \text{con lo que}$$

$$v_T = A \cos(\omega t + \phi) = \sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2} I_m \cos\left(\omega t - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{1/\omega C}{R}\right)$$

es decir, la corriente está adelantada respecto de la tensión. (Como  $\sin \phi$  es negativo y  $\cos \phi$  es positivo, el ángulo  $\phi$  está en el cuarto cuadrante.)

El módulo de la impedancia es  $\sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}$

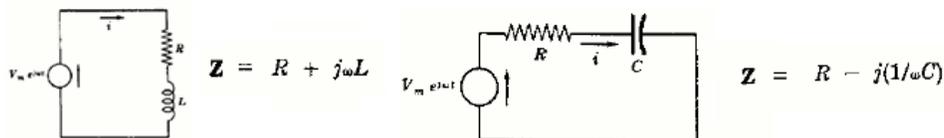
Si  $R \gg 1/\omega C$ ,  $\frac{1/\omega C}{R} \rightarrow 0$  y  $\phi \rightarrow 0$ , es decir, el mismo resultado que con un elemento positivo puro.

Si  $1/\omega C \gg R$ ,  $\frac{1/\omega C}{R} \rightarrow \infty$  y  $\phi \rightarrow \pi/2$ , es decir, el mismo resultado que obtuvimos con un condensador puro.

En una asociación serie RC la corriente está adelantada respecto de la tensión un ángulo comprendido entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  o  $\pi/2$  radianes, según los valores relativos de  $R$  y  $1/\omega C$ .

### 3.1.3.4 Impedancia compleja.

Está lejos del alcance de estas notas fundamentar la notación compleja de la impedancia de circuitos de c.a. El concepto de *impedancia compleja* de los elementos del circuito, facilita en grado sumo el estudio en régimen permanente de las señales senoidales. De aquí, que se hará una presentación muy breve de este tema.



Ahora bien, como la impedancia es un número complejo se podrá representar por un punto en el plano complejo. Además, como la resistencia óhmica no puede ser negativa, solo se precisan el primero y el cuarto cuadrante. La representación gráfica correspondiente se llama diagrama de impedancias. (Véase Figura 5-4.)

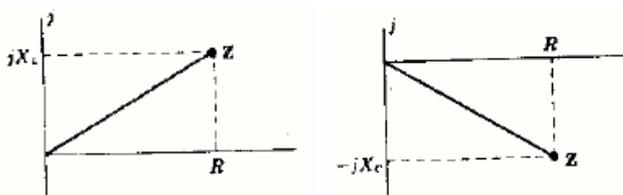
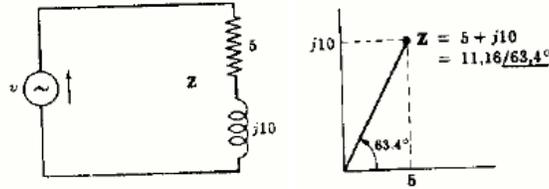


Fig. 5-4. Diagramas de impedancia

**Ejemplo 1.**

A un circuito serie  $RL$  con  $R = 5$  ohmios y  $L = 2$  milihenrios se le aplica una tensión  $v = 150 \text{ sen } 5000t$  voltios. (Véase Fig. 5-5.) Hallar su impedancia compleja  $Z$ .

La reactancia inductiva es  $X_L = \omega L = 5000(2 \times 10^{-3}) = 10 \Omega$ ; por tanto,  $Z = 5 + j10$ . En forma polar,  $Z = 11,16/63,4^\circ$ .



**Fig. 5-5**

**3.1.3.5 Distintas formas de expresar un número complejo.**

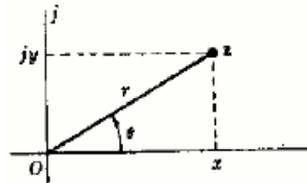
En la Fig. 4-4,  $x = r \cos \theta$ ,  $y = r \text{ sen } \theta$ , con lo que el número complejo  $z$  es

$$z = x + jy = r(\cos \theta + j \text{ sen } \theta)$$

en donde la expresión  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  se llama *módulo* de  $z$ , y el ángulo  $\theta = \text{arc tg } y/x$  recibe el nombre de *argumento* de  $z$ .

La fórmula de Euler,  $e^{j\theta} = (\cos \theta + j \text{ sen } \theta)$ , permite expresar en otra forma, que se llama *exponencial*, un número complejo (véase Problema 4-1).

$$z = r \cos \theta + jr \text{ sen } \theta = r e^{j\theta}$$



Representación polar de un número complejo  $z$

**Fig. 4-4**

En teoría de circuitos es muy frecuente emplear la forma polar o de Steinmetz de un número complejo  $Z$  y se suele escribir así:

$$\underline{r/\theta}$$

Donde  $\theta$  se mide en grados o en radianes

A continuación se resumen las cuatro formas de representar un número complejo; el empleo de una u otra depende, fundamentalmente, de la operación que se trate de efectuar.

Forma binómica	$z = x + jy$
Forma polar o de Steinmetz	$z = r/\theta$
Forma exponencial	$z = r e^{j\theta}$
Forma trigonométrica	$z = r(\cos \theta + j \sen \theta)$

### 3.1.3.6 Condiciones para el equilibrio del puente de c.a.

El puente de c.a. es una consecuencia del puente de c.d. y su forma básica consiste en un puente de cuatro ramas, una fuente de excitación y un detector de cero. La fuente de potencia suministra un voltaje de c.a. al puente con la frecuencia deseada. Para mediciones a bajas frecuencias, la línea de alimentación puede servir como fuente de excitación; a altas frecuencias, generalmente un oscilador es el que suministra el voltaje de excitación. El detector de cero debe responder a las corrientes de desequilibrio de c.a. y el dispositivo más económico y efectivo consiste en un par de audífonos. En otras aplicaciones, el detector de cero consiste en un amplificador de c.a. con un medidor de salida, o también un indicador de tubo de rayos electrónicos.

La forma general de un puente de c.a. se presenta en la figura 5-10. Las cuatro ramas del puente  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  y  $Z_4$  se indican como impedancias sin especificar y el detector se representa por medio de audífonos. Como en el caso del puente Wheatstone para mediciones de c.d., el equilibrio en este puente de c.a. se alcanza cuando la respuesta del detector es cero o indica corriente nula. El ajuste para obtener una respuesta nula se hace variando una o más ramas del puente.

La ecuación general para el equilibrio del puente se obtiene utilizando la *notación compleja* para las impedancias del circuito puente. (Las más oscuras indican cantidades en notación compleja.) Estas cantidades complejas pueden ser impedancias o admitancias, voltajes o corrientes. La condición para el equilibrio del puente requiere que la diferencia de potencial de A a C en la figura 5-10 sea cero. Este es el caso cuando la caída de voltaje de B a A es igual a la caída de voltaje de B a C, tanto en *magnitud como en fase*. En notación compleja esto es:

$$E_{BA} = E_{BC} \quad \text{o} \quad I_1 Z_1 = I_2 Z_2 \quad (5-18)$$

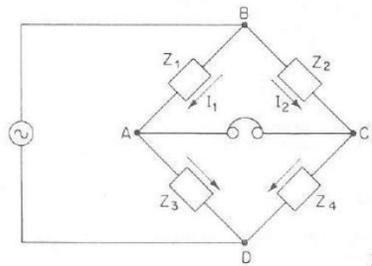


Figura 5-10. Forma general del puente de c.a.

Para la corriente del detector cero (condición de equilibrio), la corriente es

$$I_1 = \frac{E}{Z_1 + Z_3} \quad (5-19)$$

$$I_2 = \frac{E}{Z_2 + Z_4} \quad (5-20)$$

Al sustituir las ecuaciones (5-19) y (5-20) en la ecuación (5-18)

$$Z_1 Z_4 + Z_2 Z_3 \quad (5-21)$$

o cuando se utilizan admitancias en lugar de impedancias

$$Y_1 Y_4 = Y_2 Y_3 \quad (5-22)$$

La ecuación (5-21) es la forma más conveniente en la mayoría de los casos y es la *ecuación general para equilibrio* del puente de c.a. La ecuación (5-22) puede ser ventajosa cuando se tienen componentes en paralelo en las ramas del puente.

La ecuación (5-21) establece que el producto de impedancias de un par de ramas opuestas debe ser igual al producto de impedancias del otro par de ramas opuestas, con las impedancias expresadas en notación compleja. Si las impedancias se escriben en forma polar  $Z = Z \angle \theta$ , donde  $Z$  representa la magnitud y  $\theta$  el ángulo de fase de la impedancia compleja, la ecuación (5-21) se puede escribir en la forma

$$(Z_1 \angle \theta_1)(Z_4 \angle \theta_4) = (Z_2 \angle \theta_2)(Z_3 \angle \theta_3) \quad (5-23)$$

Puesto que en la multiplicación de números complejos las magnitudes se *multiplican* y los ángulos de fase se *suman*, la ecuación (5-23) también se puede escribir como

$$Z_1 Z_4 \angle (\theta_1 + \theta_4) = Z_2 Z_3 \angle (\theta_2 + \theta_3) \quad (5-24)$$

La ecuación (5-24) muestra que *dos condiciones* se deben satisfacer *simultáneamente* cuando se equilibra el puente de ca. La primera es que las magnitudes de las impedancias satisfagan la relación

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \quad (5-25)$$

o bien

*Los productos de las magnitudes de las ramas opuestas deben ser iguales.*

La segunda requiere que los ángulos de fase de las impedancias satisfagan la relación

$$\angle \theta_1 + \angle \theta_4 = \angle \theta_2 + \angle \theta_3 \quad (5-26)$$

o bien

*La suma de los ángulos de fase de las ramas opuestas debe ser igual.*

### 3.1.3.7 Aplicación de las ecuaciones de equilibrio.

Las dos condiciones de balance expresadas en las ecuaciones (5-25) y (5-26) se pueden aplicar cuando las impedancias de las ramas del puente se dan en forma polar, ambas con magnitud y ángulo de fase. Normalmente se dan los valores de las componentes de las ramas del puente y el problema se soluciona escribiendo la ecuación de equilibrio en notación compleja. Los siguientes ejemplos ilustran el procedimiento.

#### EJEMPLO 5-3

Las impedancias del puente básico de c.a. de la figura 5-10 son

$$Z_1 = 100 \Omega \angle 80^\circ \text{ (impedancia inductiva)}$$

$$Z_2 = 250 \Omega \text{ (resistencia pura)}$$

$$Z_3 = 400 \Omega \angle 30^\circ \text{ (impedancia inductiva)}$$

$$Z_4 = \text{desconocida}$$

Determinése las constantes de la rama desconocida.

**SOLUCION:** La primera condición para el equilibrio del puente requiere que

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \quad (5-25)$$

Al sustituir las magnitudes de los componentes conocidos, y resolver para  $Z_4$ , se obtiene

$$Z_4 = \frac{Z_2 Z_3}{Z_1} = \frac{250 \times 400}{100} = 1\,000 \, \Omega$$

La segunda condición requiere que la suma de los ángulos de fase de las ramas opuestas sea igual o

$$\theta_1 + \theta_4 = \theta_2 + \theta_3 \quad (5-26)$$

Al sustituir los ángulos de fase conocidos y resolver para  $\theta_4$ , se tiene

$$\theta_4 = \theta_2 + \theta_3 - \theta_1 = 0 + 30 - 80 = -50^\circ$$

Entonces la impedancia desconocida  $Z_4$  se escribe en forma polar como

$$Z_4 = 1,000 \, \Omega \angle -50^\circ$$

La cual indica que se trata de un elemento capacitivo, y posiblemente consiste de una combinación en serie de una resistencia y un capacitor.

El problema se complica cuando los valores de los componentes de las ramas del puente se especifican, expresando las impedancias en notación compleja. En este caso, las reactancias inductivas o capacitivas sólo se pueden calcular cuando la frecuencia del voltaje de excitación se conoce, como lo muestra el ejemplo 5-4.

#### EJEMPLO 5-4

El puente de la figura 5-10 se equilibra con las siguientes constantes: rama  $AB$ ,  $R = 450 \, \Omega$ ; rama  $BC$ ,  $R = 300 \, \Omega$  en serie con  $C = 0.265 \, \mu\text{F}$ ; rama  $CD$ , desconocida; rama  $DA$ ,  $R = 200 \, \Omega$  en serie con  $L = 15.9 \, \text{mH}$ . La frecuencia de oscilación es 1 kHz. Determinése las constantes de la rama  $CD$ .

**SOLUCION:** La ecuación general para el equilibrio del puente establece que

$$\begin{aligned} Z_1 Z_4 &= Z_2 Z_3 \\ Z_1 &= R = 450 \, \Omega \\ Z_2 &= R - j\omega C = (300 - j600) \, \Omega \\ Z_3 &= R + j\omega L = (200 + j100) \, \Omega \\ Z_4 &= \text{desconocida} \end{aligned} \quad (5-21)$$

al sustituir los valores conocidos en la ecuación (5-21) y resolver para la rama desconocida

$$Z_4 = \frac{450 \times (200 + j100)}{300 - j600} = +j150 \, \Omega$$

Este resultado indica que  $Z_4$  es una inductancia pura con una reactancia inductiva de 150  $\Omega$  a una frecuencia de 1 kHz. Puesto que la reactancia inductiva  $X_L = 2\pi fL$ , se resuelve para  $L$  y se tiene  $L = 23.9 \, \text{mH}$ .

#### 3.1.3.7.1 Puente Maxwell.

El puente Maxwell de la figura 5-11, se utiliza para medir una *inductancia* desconocida en términos de una *capacitancia* conocida. Una de las ramas de relación tiene una resistencia y una capacitancia en *paralelo*; ahora se puede probar que es más fácil escribir las ecuaciones de balance usando la *admitancia* de la rama 1 en vez de su impedancia.

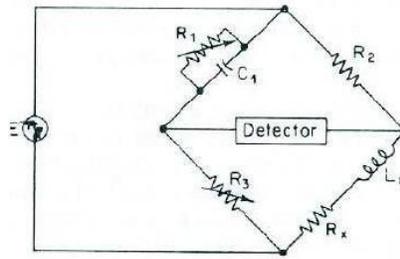


Figura 5.11. Puente Maxwell para medición de inductancias.

El reajuste de la ecuación general para el equilibrio del puente, dada en la ecuación (5-21), también se puede expresar de la siguiente forma:

$$\mathbf{Z}_x = \mathbf{Z}_2 \mathbf{Z}_3 \mathbf{Y}_1 \quad (5-27)$$

donde  $\mathbf{Y}_1$  es la admitancia de la rama 1. En relación con la figura 5-11, se tiene que

$$\mathbf{Z}_2 = R_2; \quad \mathbf{Z}_3 = R_3; \quad \text{y} \quad \mathbf{Y}_1 = \frac{1}{R_1} + j\omega C_1$$

La sustitución de estos valores en (5-27) da

$$\mathbf{Z}_x = R_x + j\omega L_x = R_2 R_3 \left( \frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \right) \quad (5-28)$$

Al separar términos reales e imaginarios

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad (5-29)$$

y

$$L_x = R_2 R_3 C_1 \quad (5-30)$$

donde las resistencias se expresan en ohms, las inductancias en henrys y las capacitancias en farads. El puente Maxwell se limita a la medición de *bobinas de Q medio* ( $1 < Q < 10$ ). Esto puede mostrarse si se considera la segunda condición de equilibrio, la cual establece que la suma de los ángulos de fase de un par de ramas opuestas debe ser igual a la suma de los ángulos de fase del otro par. Puesto que los ángulos de fase en los elementos resistivos de las ramas 2 y 3 suma  $0^\circ$ , y la suma de los ángulos de las ramas 1 y 4 también será de  $0^\circ$ . El ángulo de fase de una *bobina de Q alto* será muy cercano a  $90^\circ$  (positivos), lo cual requiere que el ángulo de fase de la rama capacitiva esté cerca de  $90^\circ$  (negativos). Esto significa que la resistencia de  $R_1$  ha de ser muy grande, lo cual es poco práctico. Las bobinas de alto Q se miden generalmente con el puente Hay (sección 5-7).

El puente Maxwell tampoco es conveniente para la medición de bobinas con muy bajo valor de Q ( $Q < 1$ ) debido a los problemas de convergencia en el equilibrio. Los valores bajos de Q presentan resistencias inductivas, por ejemplo, una bobina de RF si se mide a baja frecuencia. Como se puede observar de las ecuaciones para  $R_x$  y  $L_x$ , el ajuste para el equilibrio inductivo por  $R_3$  afecta el equilibrio resistivo de  $R_1$  y da el efecto conocido como equilibrio *deslizante*. Este describe la interacción entre los controles, de forma que el equilibrio se encuentra variando  $R_1$ , y posteriormente con  $R_3$  se repite el procedimiento que se encuentra un nuevo punto de equilibrio. El punto de equilibrio da la impresión de moverse o *deslizarse* hacia su sitio final después de muchos ajustes. La interacción no ocurre cuando  $R_1$  y  $C_1$  se usan para el ajuste del equilibrio pero un capacitor variable no siempre es adecuado.

El procedimiento normal para equilibrar el puente de Maxwell es ajustar primero  $R_3$  para el equilibrio inductivo y luego ajustar  $R_1$  para el resistivo. Después al volver al ajuste de  $R_3$  se advierte que el equilibrio resistivo se ha modificado hacia un nuevo valor. Este proceso se repite y da una convergencia *lenta* hacia el

equilibrio final. Para bobinas de Q medio, el efecto de la resistencia no es pronunciado y el equilibrio se alcanza después de pocos ajustes.

### 3.1.3.7.2 Puente Hay.

El puente Hay (figura 5-12) difiere del de Maxwell porque tiene una resistencia  $R_1$  en serie con el capacitor patrón  $C_1$  y no en paralelo. Es evidente que para ángulos de fase grandes,  $R_1$  debe tener un valor muy bajo; por consiguiente, el puente Hay es más conveniente para mediciones de bobinas de Q alto.

Las ecuaciones de equilibrio se derivan de la sustitución de los valores de las impedancias de las ramas del puente en la ecuación general para el equilibrio del puente. Para el circuito de la figura 5-12 se tiene que

$$Z_1 = R_1 - \frac{j}{\omega C_1}; \quad Z_2 = R_2; \quad Z_3 = R_3; \quad Z_x = R_x + j\omega L_x$$

La sustitución de estos valores en (5-21) da

$$\left(R_1 - \frac{j}{\omega C_1}\right) (R_x + j\omega L_x) = R_2 R_3 \quad (5-31)$$

Que se expande a

$$R_1 R_x + \frac{L_x}{C_1} - \frac{j R_x}{\omega C_1} + j\omega L_x R_1 = R_2 R_3$$

Al separar los términos reales de los imaginarios se obtiene

$$R_1 R_x + \frac{L_x}{C_1} = R_2 R_3 \quad (5-32)$$

y

$$\frac{R_x}{\omega C_1} = \omega L_x R_1 \quad (5-33)$$

ambas ecuaciones (5-32) y (5-33) contienen  $L_x$  y  $R_x$ ; por tanto, hay que resolverlas simultáneamente. Esto lleva a

$$R_x = \frac{\omega^2 C_1^2 R_1 R_2 R_3}{1 + \omega^2 C_1^2 R_1^2} \quad (5-34)$$

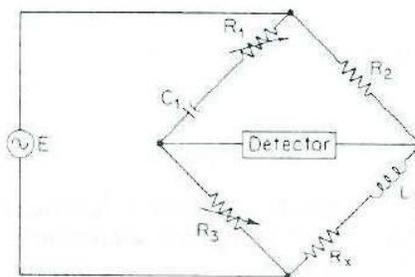


Figura 5-12. Puente Hay para medición de inductancias.

$$L_x = \frac{R_2 R_3 C_1}{1 + \omega^2 C_1^2 R_1^2} \quad (5-35)$$

Ambas expresiones para la inductancia y resistencia desconocidas contienen la velocidad angular  $\omega$ , y, por tanto, se requiere que la frecuencia de la fuente de voltaje se deba conocer con exactitud. Que esto no se aplique al medir bobinas de Q alto se sigue de las siguientes consideraciones: si se recuerda que la suma de ángulos de fase a ramas opuestas debe ser igual, el ángulo de fase inductivo ha de ser igual al ángulo de fase capacitivo, puesto que los ángulos resistivos son cero. La figura 5-13 muestra que la tangente del ángulo de fase inductivo es igual a

$$\tan \theta_L = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega L_x}{R_x} = Q \quad (5-36)$$

y que el ángulo de fase capacitivo es

$$\tan \theta_C = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega C_1 R_1} \quad (5-37)$$

Cuando los dos ángulos de fase son iguales, sus tangentes también son iguales y entonces

$$\tan \theta_L = \tan \theta_C \quad \text{o} \quad Q = \frac{1}{\omega C_1 R_1} \quad (5-38)$$

De nuevo con el término  $(1 + \omega^2 C_1^2 R_1^2)$  el cual aparece en las ecuaciones (5-34) y (5-35) se tiene que, después de sustituir (5-38) en la expresión para  $L_x$ , (5-35) se reduce a

$$L_x = \frac{R_2 R_3 C_1}{1 + (1/Q)^2} \quad (5-39)$$

Para un valor de Q mayor de 10, el término  $(1/Q)^2$  será menor que 1/100 y puede ser despreciable. La ecuación (5-35) se reduce a la expresión derivada del puente Maxwell,

$$L_x = R_2 R_3 C_1$$

El puente Hay es conveniente para medir inductores con Q alto, en especial aquellos con Q mayor de 10. Para valores de Q más pequeños que 10, el término  $(1/Q)^2$  es importante y no puede despreciarse. En este caso, el puente Maxwell es el más conveniente.

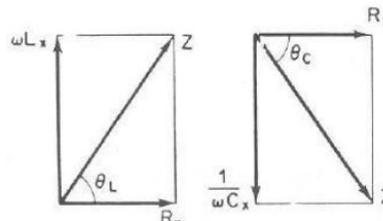


Figura 5-13. Triángulos de impedancia que ilustran los ángulos de fase inductivo y capacitivo.

### 3.1.3.7.3 Puente Schering.

El puente Schering, uno de los más importantes puentes de c.a., se usa ampliamente para la medición de *capacitores*. Aunque se utiliza para la medición de capacitancias en sentido general, es particularmente útil para la medición de algunas propiedades de aislamiento, como ángulos de fase muy cercanos a los 90°.

El circuito básico se muestra en la figura 5-14, y por una inspección general al circuito se observa muy parecido al puente de comparación. Nótese que ahora la rama 1 contiene una combinación en paralelo de una resistencia y un capacitor, y la rama patrón sólo contiene un capacitor. Por lo general, el capacitor patrón es de mica de alta calidad para mediciones generales de trabajo, o puede ser un capacitor de aire para mediciones de aislamiento. Un capacitor de mica de buena calidad tiene pérdidas muy bajas (sin resistencia) y por consiguiente un ángulo de fase de alrededor de 90°. Cuando se diseña con cuidado un capacitor de aire, éste tiene un valor muy estable y un campo eléctrico muy pequeño; el material aislante por probar se puede conservar con facilidad fuera de cualquier campo fuerte.

Las condiciones de equilibrio requieren que la suma de los ángulos de fase de las ramas 1 y 4 sea igual a la suma de los ángulos de fase de las ramas 2 y 3. Puesto que el capacitor patrón está en la rama 3, la suma de los ángulos de fase de las ramas 2 y 3 será  $0^\circ + 90^\circ = 90^\circ$ . Con el fin de obtener el ángulo de fase de 90° que se necesita para el equilibrio, la suma de los ángulos de las ramas 1 y 4 debe ser igual a 90°. Puesto que en la realización general de mediciones la cantidad desconocida tiene un ángulo de fase menor de 90°, es necesario dar a la rama 1 un ángulo capacitivo pequeño por medio de la conexión del capacitor  $C_1$  en paralelo con el resistor  $R_1$ . Un ángulo capacitivo pequeño es muy fácil de obtener; sólo se requiere un capacitor pequeño a través de  $R_1$ .

Las ecuaciones de equilibrio se derivan como es habitual; por la sustitución de los valores correspondientes de impedancia y admitancia en la ecuación general, se obtiene

$$Z_x = Z_2 Z_3 Y_1$$

o

$$R_x - \frac{j}{\omega C_x} = R_2 \left( \frac{-j}{\omega C_3} \right) \left( \frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \right)$$

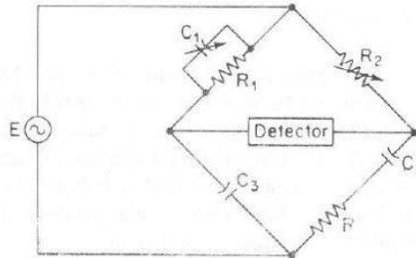


Figura 5-14. Puente Schering para la medición de capacitancia.

y si se expanden

$$R_x - \frac{j}{\omega C_x} = \frac{R_2 C_1}{C_3} - \frac{j R_2}{\omega C_3 R_1} \quad (5-40)$$

Al igualar los términos reales e imaginarios, entonces

$$R_x = R_2 \frac{C_1}{C_3} \quad (5-41)$$

$$C_x = C_3 \frac{R_1}{R_2} \quad (5-42)$$

Como se puede ver en el diagrama del circuito de la figura 5-14, las dos variables que se escogen para el ajuste del equilibrio son el capacitor  $C_1$  y el resistor  $C_2$ . Parece ser que no hay nada diferente en las ecuaciones de equilibrio o en la selección de los componentes variables, pero considérese por un momento cómo se define la calidad del capacitor.

El *factor de potencia* (PF) de una combinación serie  $RC$  se define por el coseno del ángulo de fase del circuito. Por consiguiente, el PF de la impedancia desconocida es  $PF = R_x/Z_x$ . Para ángulos de fase muy cercanos a  $90^\circ$ , la reactancia es casi igual a la impedancia y cabe aproximar el factor de potencia a

$$PF \approx \frac{R_x}{X_x} = \omega C_x R_x \quad (5-43)$$

El *factor de disipación* de un circuito serie  $RC$  se define como la cotangente del ángulo de fase y, por tanto, por definición será

$$D = \frac{R_x}{X_x} = \omega C_x R_x \quad (5-44)$$

Ya que el factor de calidad de una bobina se define por  $Q = X_L/R_L$ , se observa que el factor de disipación,  $D$ , es el recíproco del factor de calidad,  $Q$ , esto es,  $D = 1/Q$ . El factor de disipación es un factor que indica la calidad del capacitor; por ejemplo, cuán cercano está el ángulo de fase del capacitor del valor ideal de  $90^\circ$ . Con la sustitución del valor de  $C_x$  de la ecuación (5-42) y el de  $R_x$  de (5-41) en la expresión para el factor de disipación, se tiene

$$D = \omega R_1 C_1 \quad (5-45)$$

Si el resistor  $R_1$  en el puente Schering de la figura 5-14 tiene un valor fijo, el dial del capacitor  $C_1$  se puede calibrar directamente en función del factor de disipación  $D$ . Esta es la utilidad práctica del puente Schering. Nótese que el término  $\omega$  aparece en la expresión del factor de disipación [Ec. (5-45)]. Esto significa que la calibración del dial de  $C_1$  sólo se conserva para la frecuencia a la cual el dial se calibró. Se puede utilizar una frecuencia diferente multiplicando el dial  $C_1$  por la relación de las dos frecuencias. La figura 5-15 muestra un puente automático moderno.

### Condiciones de desequilibrio

Algunas veces ocurre que un puente de c.a. no se puede equilibrar debido a que es imposible establecer una de las condiciones de equilibrio (sección 5-5). Tómese como ejemplo el circuito de la figura 5-16, donde  $Z_1$  y  $Z_4$  son elementos inductivos (ángulo de fase positivo),  $Z_2$  es una capacitancia pura (ángulo de fase de  $90^\circ$ ), y  $Z_3$  es una resistencia variable (ángulo de fase cero). La resistencia de  $R_3$  que se necesita para obtener el equilibrio del puente se determina aplicando la primera condición de equilibrio (magnitudes) y entonces

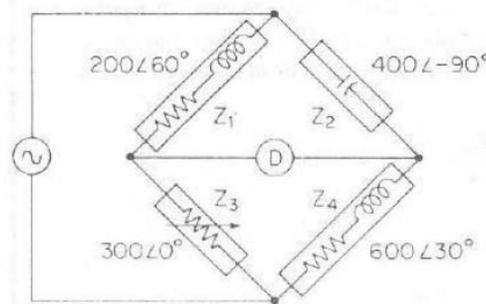


Figura 5-16. Puente de c.a. que no se puede equilibrar.

$$R_3 = \frac{Z_1 Z_4}{Z_2} = \frac{200 \times 600}{400} = 300 \Omega$$

Con el ajuste de  $R_3$  a un valor de  $300 \Omega$  se satisface la primera condición.

Considérese que la segunda condición de equilibrio (ángulos de fase) presenta la siguiente situación

$$\theta_1 + \theta_4 = +60^\circ + 30^\circ = +90^\circ$$

$$\theta_2 + \theta_3 = -90^\circ + 0^\circ = -90^\circ$$

Obviamente,  $\theta_1 + \theta_4 \neq \theta_2 + \theta_3$  y la segunda condición no se satisface.

Una ilustración interesante del problema del equilibrio del puente se da en el ejemplo 5-5, donde un mínimo ajuste a una o más de las ramas del puente origina una situación que permite el equilibrio.

### Ejemplo 5-5

Tómese el circuito de la figura 5-17a y determínese si el puente se encuentra en equilibrio; si no, muéstranse dos formas para obtenerlo y especifíquese los valores numéricos para cualquier componente adicional. Considere que la rama 4 del puente es la desconocida y no se puede modificar.

**Solución:** La inspección del circuito muestra que la primera condición de equilibrio (magnitudes) se obtiene con facilidad incrementando la resistencia de  $R_3$ . La segunda requiere que  $\theta_1 + \theta_4 = \theta_2 + \theta_3$  donde

$$\theta_1 = -90^\circ \text{ (capacitancia pura)}$$

$$\theta_2 = \theta_3 = 0^\circ \text{ (resistencia pura)}$$

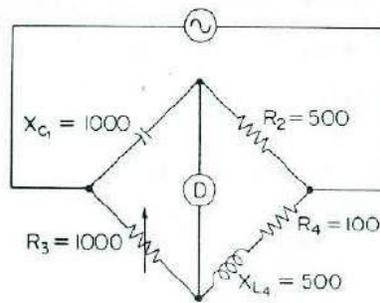
$$\theta_4 < +90^\circ \text{ (impedancia inductiva)}$$

El equilibrio es imposible con la configuración de la figura 5-17a ya que la suma de  $\theta_1$  y  $\theta_4$  será ligeramente negativa mientras que  $\theta_2 + \theta_3$  será cero. El equilibrio se obtiene modificando el circuito de forma que satisfaga la condición del ángulo de fase. Hay básicamente dos métodos para lograr esto: la primera opción es modificar  $Z_1$  de manera que el ángulo de fase disminuya a menos de  $90^\circ$  (igual a  $\theta_4$ ) colocando un resistor en paralelo con el capacitor. Esto resulta en una configuración del puente Maxwell (figura 5-17b). La resistencia de  $R_1$  se determina con el procedimiento patrón de la sección 5-6; al usar la admitancia de la rama 1 se puede escribir

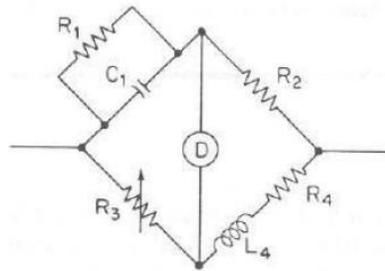
$$Y_1 = \frac{Z_4}{Z_2 Z_3}$$

donde

$$Y_1 = \frac{1}{R_1} + \frac{j}{1,000}$$



a) Condición de desequilibrio



b) El equilibrio del puente se logra mediante la adición de un resistor en la rama 1. (Configuración de Maxwell.)

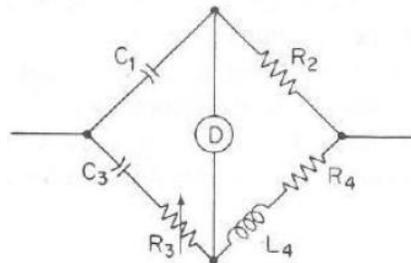


Figura 5-17. Problema del equilibrio de un puente.

c) Método alternativo para restaurar el equilibrio del puente mediante la adición de un capacitor en la rama 3.

Al sustituir los valores conocidos y resolver para  $R_1$  se obtiene

$$\frac{1}{R_1} + \frac{j}{1\,000} = \frac{100 + j500}{500 \times 1\,000}$$

Y

$$R_1 = 5\,000\ \Omega$$

La adición de  $R_1$  altera la primera condición de equilibrio del circuito (la magnitud de  $Z_1$  ha cambiado) y la resistencia variable  $R_3$  se debe ajustar para compensar este efecto.

La segunda opción es modificar el ángulo de fase de la rama 2 o 3 añadiendo un capacitor en serie (figura 5-17c). La ecuación general de equilibrio se escribe de nuevo, ahora con impedancias, y se obtiene

$$Z_3 = \frac{Z_1 Z_4}{Z_2}$$

Al sustituir los valores de los componentes y resolver para  $X_C$

$$1,000 - jX_C = \frac{-j1\,000(100 + j500)}{500}$$

o

$$X_C = 200\ \Omega$$

En este caso también la magnitud de  $Z_3$  se ha incrementado, así que la primera condición de equilibrio ha cambiado. Un pequeño reajuste en  $R_3$  es necesario para restablecer el balance.

### 3.1.3.7.4 Puente Wien.

El puente Wien se presenta aquí por su uso como puente de c.a. para medir *frecuencias* y por las aplicaciones que tiene en otros circuitos; por ejemplo, en el analizador de distorsión armónica, en donde se usa como un *filtro pasabanda*, el cual puede discriminar una frecuencia específica. El puente Wien también tiene aplicaciones en los osciladores de audio y HF como el elemento que *determina la frecuencia*. En este capítulo se estudia en su forma básica, diseñado para la medición de frecuencia; en otros capítulos se analiza la aplicación en diferentes tipos de instrumentos.

El puente Wien tiene una combinación en serie  $RC$  en una rama y una combinación en paralelo  $RC$  en la rama adjunta (figura 5-18). La impedancia de la rama 1 es  $Z_1 = R_1 - j/\omega C_1$ . La admitancia de la rama 3 es  $Y_3 = 1/R_3 + j\omega C_3$ . Con la ecuación básica para el balance del puente y al sustituir los valores apropiados se obtiene

$$R_2 = \left( R_1 - \frac{j}{\omega C_1} \right) R_4 \left( \frac{1}{R_3} + j\omega C_3 \right) \quad (5-46)$$

Al expandir esta expresión se llega a

$$R_2 = \frac{R_1 R_4}{R_3} + j\omega C_3 R_1 R_4 - \frac{jR_4}{\omega C_1 R_3} + \frac{R_4 C_3}{C_1} \quad (5-47)$$

Al igualar los términos *reales*

$$R_2 = \frac{R_1 R_4}{R_3} + \frac{R_4 C_3}{C_1} \quad (5-48)$$

lo cual se reduce a

$$\frac{R_2}{R_4} = \frac{R_1}{R_3} + \frac{C_3}{C_1} \quad (5-49)$$

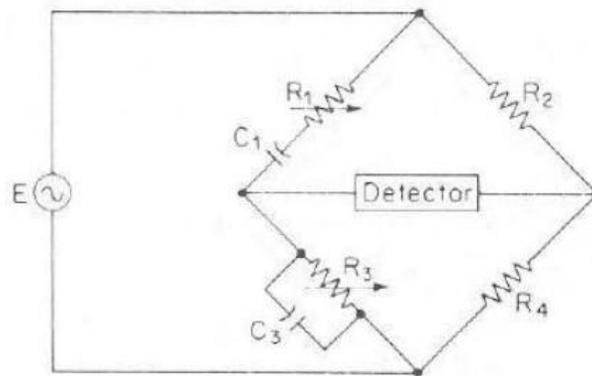


Figura 5-18. Medición de frecuencia con el puente Wien.

Al igualar los términos *imaginarios* se tiene

$$\omega C_3 R_1 R_4 = \frac{R_4}{\omega C_1 R_3} \quad (5-50)$$

donde  $\omega = 2\pi f$ , y al resolver para  $f$ , se obtiene

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1 C_3 R_1 R_3}} \quad (5-51)$$

Nótese que las dos condiciones para el equilibrio del puente resultan en una expresión que determina la relación de resistencias requerida  $R_2/R_4$ , y otra expresión que determina la frecuencia del voltaje aplicado. En otras palabras, si se satisface la ecuación (5-49), y se excita el puente con la frecuencia descrita por la ecuación (5-51), el puente queda en equilibrio.

En la mayoría de los circuitos del puente Wien, los componentes se seleccionan de manera tal que  $R_1 = R_3$  y  $C_1 = C_3$ . Esto reduce la ecuación (5-49) a  $R_2/R_4 = 2$  y la ecuación (5-51) a

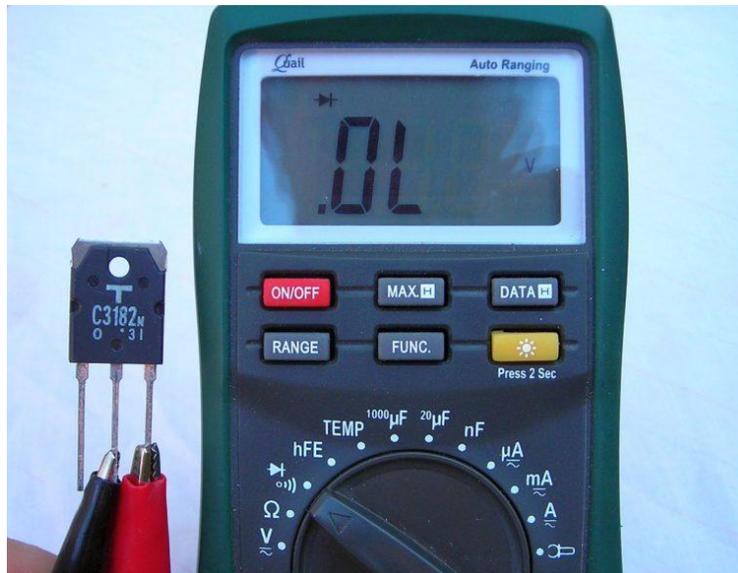
$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5-52)$$

la cual es la expresión general para la frecuencia del puente Wien. En un puente práctico, los capacitores  $C_1$  y  $C_3$  son capacitores fijos, y los resistores  $R_1$  y  $R_3$  son resistores variables controlados por un eje común. Si se tiene que  $R_2 = 2 R_4$ , el puente se puede usar como un dispositivo para determinar la frecuencia en equilibrio por un solo control. Este control se puede calibrar directamente en términos de frecuencia.

Debido a su sensibilidad a la frecuencia, el puente Wien puede ser difícil de equilibrar (a menos que la forma de onda del voltaje aplicado sea puramente senoidal). Ya que el puente *no* se equilibra con cualquier armónica presente en el voltaje aplicado, estas armónicas producen algunas veces un voltaje de salida que distorsiona el punto de equilibrio.

### 3.1.4. Prueba de dispositivos semiconductores.

Existen instrumentos de medición digitales que traen una base para realizar ciertas pruebas a dispositivos semiconductores, tales como diodos y transistores. En ausencia de estos instrumentos, el multímetro analógico es un instrumento útil.

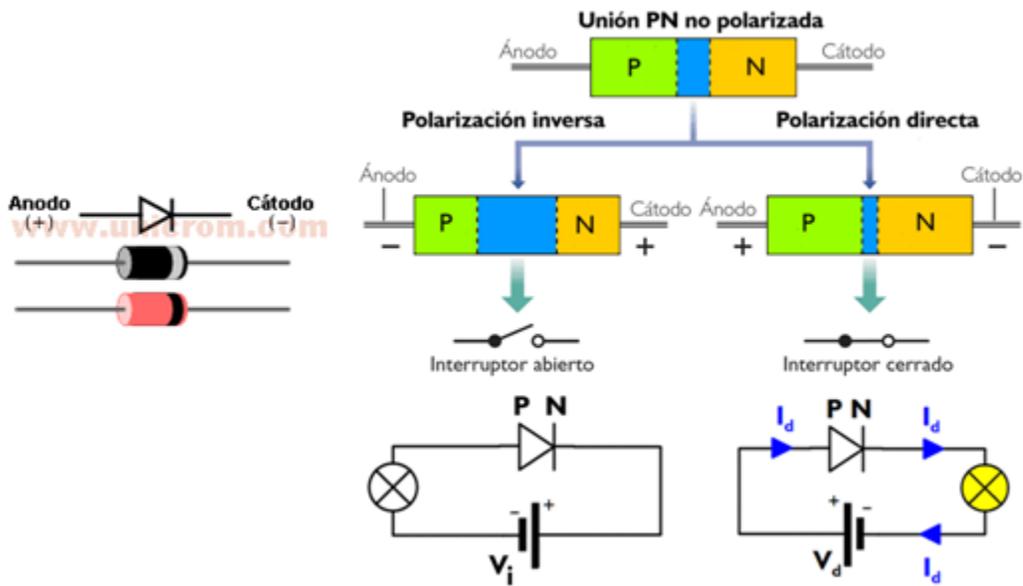


Medir o hacer pruebas a diodos y transistores es una tarea muy sencilla. Pero saber hacerlo es cosa distinta que requiere de ciertos cuidados y atenciones especiales que trataremos de transmitir en esta nota. Para realizar el trabajo se debe disponer de un multímetro, que puede ser digital o analógico. Aunque el primer modelo mencionado es más sencillo de utilizar y de leer, para esta explicación se utiliza también un analógico, de aguja común, y con posibilidades de medir resistencias X 10.000 Ohms o valores superiores. Comenzaremos la explicación utilizando uno digital

#### 3.1.4.1 El diodo semiconductor.

##### 3.1.4.1.1 La teoría del diodo.

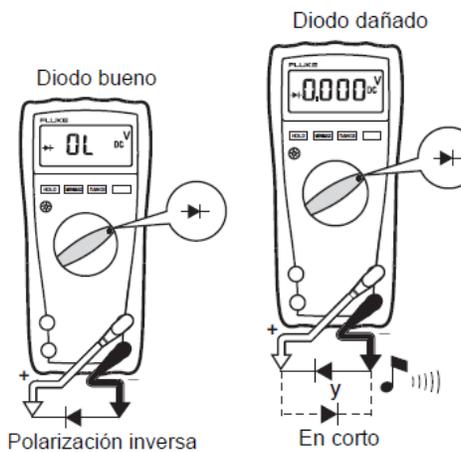
Un diodo es el resultado de la unión entre dos semiconductores que, de acuerdo a sus características constructivas, se denominan materiales N y P. Los materiales N se caracterizan por poseer, dentro del silicio que lo forman, impurezas que agregan electrones libres, mientras que los del tipo P tienen impurezas que carecen de electrones respecto al silicio, es decir, abundan los “huecos” formados por los faltantes de electrones. Unidos apropiadamente de manera física, forman una unión o juntura N-P, quedando a ambos lados de la construcción dos sectores bien definidos que, en la práctica, se los conoce como Cátodo y Ánodo, respectivamente. Durante la fabricación, y al momento de unirse los materiales entre sí, se produce un fenómeno de actividad electrónica en el material de la unión y llegan a formar una barrera de potencial que se opone al flujo de electrones a través de la unión. También podemos agregar que si hacemos circular corriente en un sentido, el dispositivo lo permitirá, pero si lo intentamos a la inversa, se comportará como un interruptor abierto. Veámoslo en imágenes prácticas.



### 3.1.4.1.2 Pruebas con el diodo



#### Medición de un Diodo polarizado en forma directa (conduce)



#### Medición de un Diodo polarizado en forma inversa (no conduce)

De esta forma obtendremos las mediciones de un diodo en correcto estado de funcionamiento. En un sentido, el multímetro nos indica el potencial que posee la juntura N-P del diodo y, en el sentido inverso

(observa el color de las pinzas), la conducción se interrumpe indicando que la lectura está fuera de rango. La mejor recomendación que podemos darte al momento de medir cualquier componente, sea semiconductor o no, es desconectar al menos uno de sus terminales del sitio donde se encuentre montado (soldado). Si no desconectas uno de los terminales del diodo, puedes obtener mediciones confusas que tal vez te induzcan a actuar erróneamente. Por ejemplo: si tienes en un circuito un diodo conectado con una resistencia en paralelo (dependiendo del valor de la resistencia mencionada) puedes creer que el diodo esté en mal estado cuando en realidad es la resistencia la que te brinda conducción en ambos sentidos. Recuerda siempre estas dos premisas fundamentales: desconecta uno de los terminales del diodo y mídelo en ambos sentidos, es decir, invirtiendo las puntas del multímetro.

En el caso del diodo LED, el valor marcado en la pantalla del multímetro es el voltaje aproximado para polarizarlo directamente, en este caso es alrededor de 2.5 Voltios, mientras que para un diodo rectificador de silicio de 1A el voltaje marcado en el multímetro será alrededor de 0.6 a 0.7 Voltios.

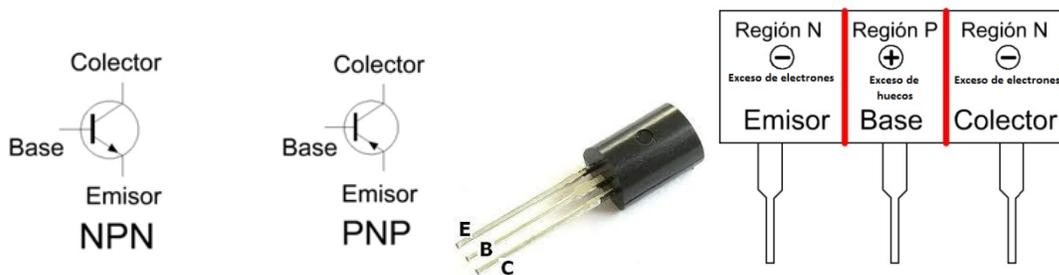
Cuando trabajas con un multímetro analógico, la situación mejora en el aspecto de la seguridad de la medición, especialmente cuando se mide una juntura N-P en sentido inverso, es decir, en el sentido en que no presenta conducción. La posibilidad que aquí aparece es la de poder aumentar la escala de medición de resistencia. De esta forma, podremos llegar a medir pequeñas fugas imperceptibles al multímetro digital.



El multímetro digital no permite medir las fugas mencionadas porque no aplica la suficiente voltaje al diodo. Las tensiones utilizadas para realizar las mediciones por parte de un multímetro digital son inferiores. Una medición efectuada en una escala de X 10K es suficiente y correcta para lograr una buena “medición inversa” en una juntura N-P o viceversa. Un ejemplo sencillo de probar esto es que con un instrumento a aguja, un simple LED alcanza a encender, mientras que con uno digital no luce con igual intensidad.

### 3.1.4.2 Pruebas con los transistores.

Debemos primero conocer la construcción y estructura física de un transistor para saber bien lo que vamos a medir. Los transistores “bipolares” se concentran en dos grandes grupos: los N-P-N y los P-N-P, siendo su simbología muy conocida en circuitos electrónicos.

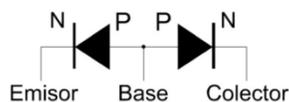


Por la intención que sigue el tema que se está tratando, que es el uso de instrumentos de medición, no vamos a explicar el funcionamiento de cada tipo de transistor. Por ello únicamente se darán datos claves para medirlos correctamente. Para comenzar, seleccionamos un tipo de transistor al azar (el NPN). Se puede ver en el dibujo siguiente que lo obtenido es muy similar a la estructura que antes conocíamos del diodo. A la unión N-P preexistente le agregamos un nuevo bloque semiconductor (tipo N), y el conjunto resultante se transforma en un dispositivo de tres terminales de conexión y dos tipos de silicio.

Si hubiésemos elegido para los extremos el material tipo P (con exceso de huecos) y para el bloque central uno del tipo N (exceso de electrones), hubiera quedado un transistor P-N-P.

Aclaración importante: El dibujo mostrado no tiene nada que ver con la realidad física de un transistor. Lo hemos dibujado así para que se pueda apreciar las partes que lo componen y que se pueda conocer cómo se denominan.

Si se observa el dibujo, se verá dos líneas rojas que representan a las dos junturas que se han formado a ambos lados del terminal denominado BASE por la unión de los materiales N y P, respectivamente. Si se asocia esta particularidad física con los diodos, con sus junturas N y P, lo mostrado equivale a esto:

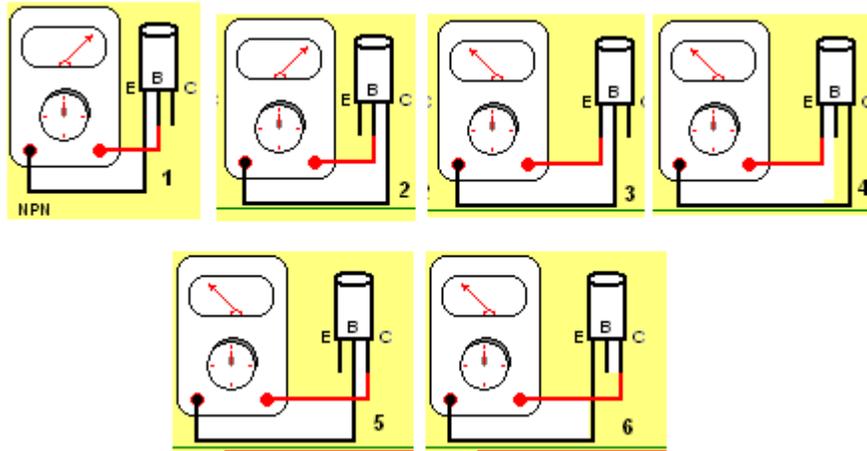


Entonces se puede descubrir que un transistor NPN equivale a dos diodos conectados en oposición con sus ánodos unidos.

Aclaración importante: Las analogías que indicamos entre la composición física de un transistor y los diodos comunes es a modo de ejemplo para que resulte sencillo de analizar lo que se medirá. No significa que si se toman dos diodos y se conectan enfrentados trabajarán como un transistor. NO. Es para tener una idea de que medir un transistor bipolar común tipo PNP o NPN no es ninguna ciencia complicada; es lo mismo que medir dos diodos enfrentados entre sí.

### 3.1.4.2.1 Cómo se puede determinar cuál es la base de un transistor:

Cuando se desconoce qué pin de un transistor le corresponde ser la base, colector o emisor, es necesario hacer la identificación por medio del multímetro. En la secuencia siguiente de imágenes vamos a enseñar como determinar cuál es la base de un transistor.



Paso 1: Se coloca la punta roja en cualquiera terminal (suponiendo que se empezó con la base B), y se coloca la punta negra, primero en uno de los pines, y luego en el otro. En los dos pines la aguja subirá ( ver figuras 1 y 2 ).

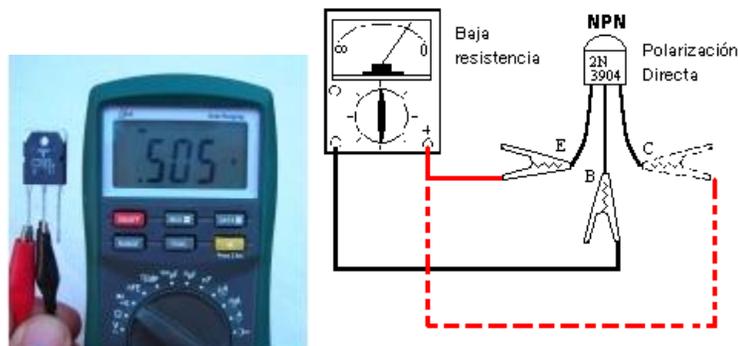
Paso 2: Colocamos la punta roja en otro pin (suponemos que fue el emisor E), y volvemos a repetir lo hecho en el paso anterior ( ver figuras 3 y 4 ), la aguja no debería de subir en ninguno de los casos.

Paso 3: Volvemos a colocar la punta roja en el pin que sigue (debe ser el colector C), y volvemos a repetir lo hecho en el paso anterior ( ver figuras 5 y 6 ), la aguja no debería de subir en ninguno de los casos.

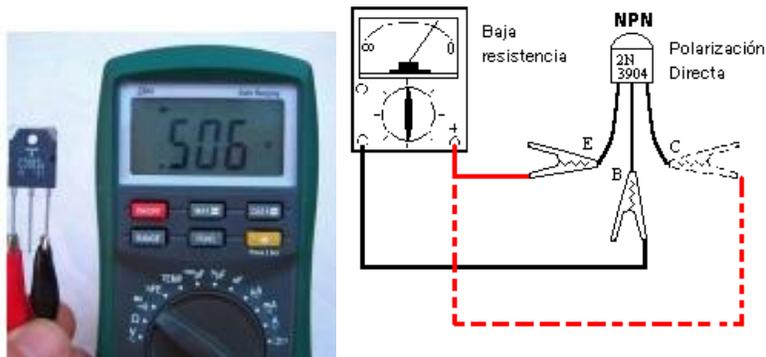
Bien, aclaremos ahora, la base será aquella en que la aguja haya subido al colocar la otra punta en los otros 2 pines alternativamente; puede ser que la punta roja estuviera en ese momento fija y con la negra midiéramos los otros 2 pines, este es el caso el transistor es NPN.

En el transistor PNP, seguir las instrucciones de los 3 pasos, considerando la punta negra fija.

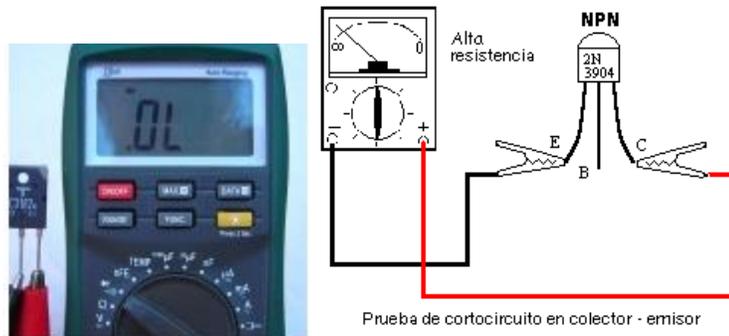
Ya sabemos cuál es la base, pero ignoramos cuál es el colector y el emisor.



Medición Base-Colector en polarización directa



**Medición Base-Emisor en polarización directa**



**Medición Colector-Emisor**

Si observas la galería de imágenes que figura arriba, comprobarás que el terminal llamado BASE es el que se encuentra a la izquierda del encapsulado. Al centro, se encuentra el COLECTOR y, a la derecha, el EMISOR. Como resultado, tenemos al multímetro con su llave selectora colocada en su posición para medir DIODO; en dicho multímetro leemos que: BASE – EMISOR conduce, BASE – COLECTOR conduce, y COLECTOR – EMISOR lógicamente no conduce. ¿Por qué decimos lógicamente? Porque allí no estamos midiendo una juntura en directa sino que al momento de realizar la medición hay que atravesar dos junturas, según el gráfico antes visto. Una de ellas sí quedaría polarizada en “directa”, pero la otra no; esto hace que la medición sea equivalente a un circuito abierto. Entonces, puedes extraer del análisis hecho que entre COLECTOR y EMISOR nunca habrá conducción en ninguno de los sentidos y en ninguno de los tipos de transistores bipolares NPN o PNP que intentemos medir y controlar.

Aclaración importante: No existen sólo dos tipos de transistores bipolares. Nosotros elegimos para la explicación los más elementales que son el NPN y el PNP. Con el tiempo y la práctica descubrirás una cantidad interminable de variantes de combinaciones N y P, que forman transistores de características especiales y que además agregan, dentro del encapsulado, diodos, resistencias y hasta otros transistores creados en el entorno de diseños muy específicos para aplicaciones también muy específicas.

### 3.1.4.2.2 Uso del multímetro analógico.

De la misma forma que te dejamos una galería de imágenes con el multímetro digital, ahora se verá particularidades del uso del instrumento analógico.



**Medición Base-Emisor en polarización directa**



**Medición Base-Emisor en polarización inversa**



**Medición Base-Emisor en polarización inversa por alta resistencia**

En las tres imágenes vemos las posibilidades que nos presenta una medición BASE – EMISOR. En la primera, a la izquierda, tenemos una medición en polarización directa la que, como vemos, conduce normalmente cual si fuera un diodo. En la fotografía central, hemos invertido las puntas de medición, y la juntura se ha polarizado en inversa y ha dejado de conducir. Y en la última imagen, a la derecha, te mostramos la situación verdaderamente importante de la nota, que nos permite el instrumento de aguja. Es muy obvio notar que la juntura examinada está excelente ya que tanto en R X 1 como en R X 10K la aguja no se mueve en absoluto. No existen fugas de corriente a través de las junturas.

Aclaración importante: Cuando realices mediciones en alta resistencia, no toques los terminales del instrumento ya que el mismo indicará la resistencia propia de tu cuerpo a través de tus manos, entregándote mediciones erróneas.

Debes acostumbrarte ahora a poder determinar fácilmente la identificación de los terminales de un transistor. Es decir, cuál es la BASE, cuál es el EMISOR y cuál es el COLECTOR. Para facilitarnos la vida a todos, los fabricantes entregan las famosas hojas de datos o datasheets que te brindan la información completa del encapsulado y de las características eléctricas más importantes del transistor.

DatasheetCatalog.com es un sitio muy completo y en castellano que te permite fácilmente acceder a las hojas de datos de millones de transistores. Sólo debes descubrir la característica o nomenclatura correcta del BJT (Bipolar Junction Transistor) que desconoces y buscarlo. Una vez que tengas la data en tu mano, resta la medición y nada más

**Consejos:**

- 1 – Desconecta uno de los terminales del diodo antes de medirlo.
- 2 – Si es un transistor, se recomienda desconectar dos terminales: BASE y EMISOR.
- 3 – Utiliza la posición DIODO al medir con un multímetro digital.
- 4 – Si utilizas un instrumento de aguja, mide en R X 1.
- 5 – Si tienes dudas al medir una juntura en polarización inversa, utiliza un instrumento analógico en R X 10K.

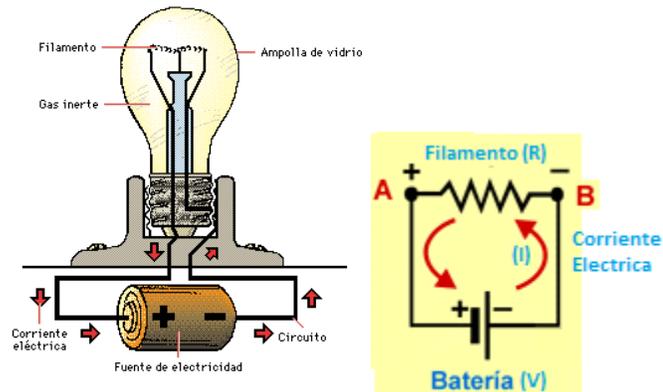
### 3.2 Medición de potencia y energía.

#### 3.2.1 Trabajo y Potencia eléctrica c.d.

Cuando una corriente eléctrica circula por un circuito, éste opone una resistencia al paso de la misma. Los electrones, en su camino, se ven frenados, experimentando diversos choques con los átomos. En estos choques se desprende calor, y este efecto se utiliza para construir parrillas y focos eléctricos. Por otra parte, es bien sabido que existen máquinas eléctricas capaces de transformar la corriente en trabajo mecánico (giro de motores). En otras palabras, la energía eléctrica se transformó en energía térmica, luminosa o mecánica, es decir, se dio la transformación de energía a trabajo.

Resulta muy útil conocer cuánto trabajo puede producir una corriente eléctrica. Para ello es preciso concretar antes las siguientes definiciones:

Para que haya circulación de corriente en un circuito eléctrico con una resistencia R debe haber un generador de f.e.m. o batería con una diferencia de potencial de V voltios, que es el elemento que proporciona la energía.



Usando la definición de diferencia de potencial V dada en la unidad I, tenemos

$$V_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} \rightarrow W_{AB} = q \cdot V_{AB}$$

Esta expresión determina la cantidad de energía consumida, que se transformó en trabajo, sabiendo la cantidad de carga que paso por el circuito.

Como la corriente eléctrica es  $I = \frac{q}{t} \rightarrow W_{AB} = I \cdot V_{AB} \cdot t$

Esta expresión determina la cantidad de energía consumida, que se transformo en trabajo, sabiendo la cantidad de corriente eléctrica que pasa por el circuito y el tiempo que ocupó el circuito.

Si consideramos el tiempo en que se produce dicho trabajo, es decir, la velocidad con la que se realiza, se le llama POTENCIA.

$$P = \frac{W_{AB}}{t} \rightarrow P = \frac{q}{t} \cdot V_{AB}$$
$$P = I \cdot V_{AB} \quad (20)$$

De la misma manera podemos decir que: el trabajo es igual a la potencia por el tiempo.

$$W = P \cdot t$$

Con esto podemos decir que para una misma potencia realizaremos más trabajo cuanto más tiempo la estemos empleando.

Las unidades de potencia P en el sistema internacional de unidades: 1 Watt = 1 Julio / 1 segundo (1 W = 1 J / 1 s).

**Ejemplo 1.** : a) ¿Cuál será la potencia o consumo en watt de un foco conectado a una red de energía eléctrica doméstica monofásica de 220 volt, si la corriente que circula por el circuito del foco es de 0,45 ampere? b) ¿Que energía se transformó en una hora?

a) Sustituyendo los valores en la fórmula tenemos:

$$\begin{aligned}P &= I \cdot V_{AB} \\P &= 0.45 \cdot 220 \\P &= 100 \text{ watt}\end{aligned}$$

Es decir, la potencia de consumo del foco será de 100 W.

b) Hallar la intensidad de la corriente que fluye por el foco y conocemos la potencia y la tensión o voltaje aplicada al circuito, usamos la fórmula

$$I = \frac{P}{V_{AB}}$$

Si realizamos la operación utilizando los mismos datos del ejemplo anterior, tendremos:

$$I = \frac{P}{V_{AB}} = \frac{100}{220} = 0,45 \text{ A}$$

Entonces, la energía consumida es:  $W_{AB} = I \cdot V_{AB} \cdot t = 0.45 \cdot 220 \cdot 3600 = 356 \text{ kJ}$

La potencia también se puede calcular al utilizar cualquiera de las dos fórmulas siguientes:

$P = I^2 \cdot R$	O	$P = \frac{V^2}{R}$
-------------------	---	---------------------

### 3.2.2 Electrodinamómetro.

Uno de los mecanismos más importantes para medir c.a. es el *electrodinamómetro*. Se utiliza a menudo en voltímetros y amperímetros de c.a. muy exactos, no solamente para la medición de señales de alta frecuencia de la línea de energía sino también para señales que se encuentren en rangos bajos de audiofrecuencia. Con algunas pequeñas modificaciones, el electrodinamómetro se puede emplear como wattímetro, medidor de factor de potencia o frecuencímetro.

El electrodinamómetro utiliza la corriente por medir para producir el flujo de campo necesario. La figura 4-26 muestra las partes de este mecanismo. Una bobina fija, dividida en dos partes iguales, proporciona el campo magnético en el cual gira la bobina móvil. Las dos medias bobinas se conectan en serie con la bobina móvil y se alimentan con la corriente por medir. Hay suficiente espacio entre las bobinas fijas para permitir el paso del eje de la bobina móvil. La bobina móvil tiene unida una aguja balanceada por medio de un contrapeso. Su rotación se controla mediante resortes, similar a la construcción del galvanómetro D'Arsonval. El montaje completo está rodeado por un blindaje laminado para proteger el instrumento de los campos magnéticos exteriores que puedan afectar su operación. El amortiguamiento se logra mediante aletas de aluminio que se mueven en cámaras de aire. El mecanismo se construye en forma muy sólida y

rígida, para mantener invariables sus dimensiones mecánicas y que su calibración esté intacta. Una vista de un corte de un electrodinamómetro se muestra en la figura 4-27.

Para entender la operación del instrumento conviene recordar las expresiones del par desarrollado por una bobina suspendida en un campo magnético. Se definió anteriormente (ecuación 4-1) que

$$T = B \cdot A \cdot I \cdot N$$

indica que el par  $T$  que defleca la bobina móvil es directamente proporcional a las constantes de la bobina ( $A$  y  $N$ ), la intensidad del campo magnético en el cual la bobina se mueve ( $B$ ), y a la corriente que circula por la bobina. En el electrodinamómetro la densidad de flujo ( $B$ ) depende de la corriente que circula a través de la bobina fija y por lo tanto es directamente proporcional a la corriente de deflexión ( $I$ ). Puesto que las dimensiones de la bobina y su número de vueltas son cantidades fijas para un medidor dado, el par desarrollado es una función de la corriente al cuadrado ( $I^2$ )

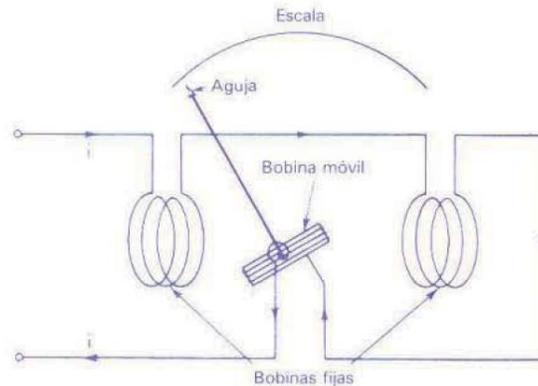


Figura 4-26. Diagrama esquemático del mecanismo de electrodinamómetro.

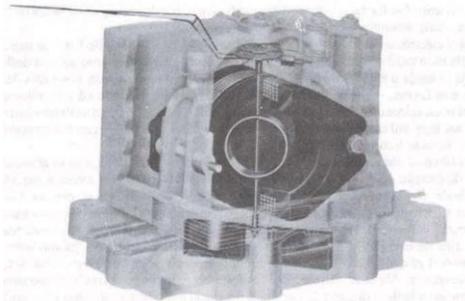


Figura 4-27. Vista interior de un electrodinamómetro; muestra los arreglos de bobinas fijas y móviles. El mecanismo es construido rígidamente, rodeado de un blindaje laminado para minimizar el efecto de los campos magnéticos externos en la indicación del medidor.

El movimiento del electrodinamómetro no puede seguir las rápidas variaciones del par y toma una posición en la cual el par *promedio* se equilibra con el par de control de los resortes. La deflexión del medidor es función de la *media del cuadrado de la corriente*. La escala del electrodinamómetro se calibra en términos de la raíz cuadrada de la corriente promedio al cuadrado; de esta forma, el medidor indica *valores efectivos* o *rms* de la ca.

Las propiedades de transferencia del electrodinamómetro son claras cuando se compara el valor efectivo de una corriente alterna con el de la corriente directa en términos de sus efectos caloríficos o transferencia de potencia. Una corriente alterna que produce calor en una resistencia dada a la misma razón promedio que una corriente directa ( $I$ ) tiene, por definición una corriente de  $I$  amperes. La razón promedio de generación de calor por una cd de  $I$  amperes en una resistencia  $R$  es  $I^2 R$  watts. La razón promedio de generación de calor por una ca de  $i$  amperes durante un ciclo en la misma resistencia  $R$  es

$$\frac{1}{T} \int_0^T i^2 R dt$$

Por definición,

$$I^2 R = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 R dt$$

y

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\text{promedio } i^2}$$

Esta corriente  $I$  se llama raíz cuadrática media (rms) o valor efectivo de la corriente alterna, suele denominársele valor de *cd equivalente*.

Si el electrodinamómetro se calibra con una corriente directa de 1 A y se marca la escala para indicar este valor de 1 A cd la corriente alterna que produce una deflexión de la aguja a esa misma marca en la escala corresponderá a un valor *rms* de 1 A. De esta forma, se puede “transferir” una lectura realizada con cd a su valor en ca y así se establece una correspondencia directa entre ca y cd. El electrodinamómetro puede ser muy útil como un instrumento de *calibración*, y se utiliza con este propósito, por su exactitud inherente.

El electrodinamómetro presenta ciertas desventajas. Una de ellas es su alto consumo de energía, como consecuencia directa de su construcción. La corriente medida, además de circular por la bobina móvil debe proporcionar el flujo de campo. Para obtener suficiente campo magnético fuerte, se requiere una alta fmm (fuerza magnetomotriz) y la fuente debe suministrar corriente y potencia altas. A pesar de este consumo alto de energía, el campo magnético es más débil que el del galvanómetro D’Arsonval ya que no hay hierro en el circuito; es decir, toda la trayectoria de flujo se da en el aire.

La adición de una resistencia en serie convierte al electrodinamómetro en un voltímetro, el cual otra vez puede usarse para medir voltajes de cd y ca. Por las razones mencionadas, la sensibilidad de un voltímetro electrodinamómetro es baja, del orden de 10 a 30  $\Omega/V$  (comparada con 20  $k\Omega/V$  de un medidor D’Arsonval). La reactancia y la resistencia de la bobina también se incrementan cuando aumenta la frecuencia, limitando la aplicación del voltímetro electrodinamómetro a rangos de frecuencias bajas. Es muy exacto para la medición de señales a la frecuencia de la línea de energía.

El mecanismo electrodinamómetro (incluso sin derivación) se puede utilizar como un amperímetro, sin embargo es difícil diseñar una bobina móvil que pueda conducir más de aproximadamente 100 mA. Las corrientes altas se deberían conducir hacia la bobina móvil mediante terminales de alambre grueso, con lo que se perdería su flexibilidad. En caso de emplear una derivación, se coloca únicamente a través de la bobina móvil. Las bobinas fijas se fabrican de alambre grueso, y pueden conducir corrientes altas. Esto permite construir amperímetros para corrientes de hasta 20 A. Para medir valores de corrientes de ca mayores, se utilizan transformadores de corriente y un amperímetro patrón de 5 A ca (sección 4-16).

### 3.2.3 Electrodinamómetros en mediciones de potencia

El mecanismo electrodinamómetro se utiliza frecuentemente en las mediciones de potencia. Sirve para indicar tanto la potencia de cd como de ca para cualquier onda de voltaje y corriente; esto es, no se reduce ondas senoidales. Como se describió en

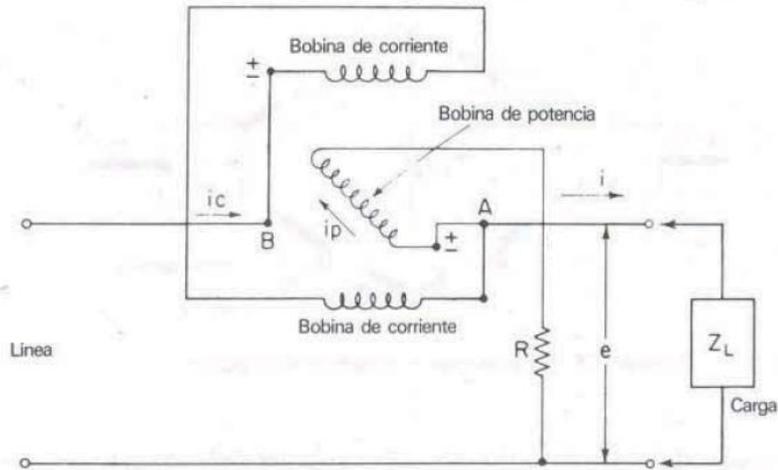


Figura 4-36. Diagrama esquemático de un wattímetro electrodinámico conectado para medir la potencia en una carga monofásica.

En la sección 4-11. 1, el electrodinamómetro utilizado como voltímetro o amperímetro tiene las bobinas fijas y la móvil conectada en serie, de esta forma reaccionan al efecto del cuadrado de la corriente. Cuando se utilizan como *medidor de potencia monofásica*, las bobinas están conectadas en diferente forma (figura 4-36).

Las bobinas fijas, o *bobina de campo*, que aparecen aquí como dos elementos separados, están conectadas en serie y llevan una corriente de línea total ( $i_c$ ). La bobina móvil, colocada en el campo magnético de las bobinas fijas, está conectada en serie con una resistencia limitadora de corriente a través de la línea de potencia, en la cual circula una pequeña corriente ( $i_p$ ). El valor instantáneo de la corriente en la bobina móvil es  $i_p = e/R_p$ , donde  $e$  es el voltaje instantáneo a través de la línea de potencia y  $R_p$  es la resistencia total de la bobina móvil y su resistencia en serie. La deflexión de la bobina móvil es proporcional al producto de estas dos corrientes  $i_p$  e  $i_c$ ; se puede escribir para una deflexión promedio sobre un periodo:

$$\theta_{av} = K \frac{1}{T} \int_0^T i_c i_p dt$$

donde  $\theta_{av}$  = deflexión angular promedio de la bobina

$K$  = constante del instrumento

$i_c$  = corriente instantánea en las bobinas de campo

$i_p$  = corriente instantánea en la bobina de potencial

Considerando por el momento, que  $i_c$  es igual a la corriente de carga,  $i$  (en realidad  $i_c = i_p + i$ ) y con el valor  $i_p = e/R_p$ , la ecuación 4-28 se reduce a

$$\theta_{av} = K \frac{1}{T} \int_0^T i \frac{e}{R_p} dt = K_2 \frac{1}{T} \int_0^T ei dt \quad (4-29)$$

Por definición, la potencia promedio de un circuito es

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T ei dt \quad (4-30)$$

lo cual indica que el mecanismo del electrodinamómetro, conectado en la configuración de la figura 4-36, tiene una deflexión proporcional a la potencia promedio. Si  $e$  u  $i$  son cantidades variables senoidales de la forma

$$e = E_m \sin(\omega t)$$

e

$$i = I_m \sin(\omega t \pm \theta)$$

la ecuación 4-29 se reduce a

$$\theta_{av} = K_3 EI \cos \theta \quad (4-31)$$

donde  $E$  e  $I$  representan los valores rms del voltaje y corriente, y  $\theta$  el ángulo de fase entre el voltaje y la corriente. Las ecuaciones (4-29) y (4-30) muestran que el electrodinamómetro indica la potencia promedio entregada a la carga.

Los wattímetros tienen una terminal de voltaje y una terminal de corriente marcadas “±”. Cuando la terminal de corriente marcada se conecta a la línea de entrada y la terminal de voltaje marcada se conecta en el lado de la línea en donde la bobina de corriente se conecta, la aguja del medidor se moverá en sentido directo cuando la energía se conecta a la carga. Si por cualquier razón (como en el método de dos wattímetros para la medición de potencia trifásica), el medidor marcará hacia atrás, se deben invertir las conexiones de *corriente* (no las de voltaje).

El wattímetro electrodinamómetro consume determinada energía para el mantenimiento de su campo magnético; pero por lo general es muy pequeña en comparación con la potencia de la carga y se puede despreciar. Si se requiere la lectura correcta de la potencia de la carga, la corriente de la bobina debe conducir exactamente la corriente de carga y la bobina de potencia se debe conectar a través de las terminales de carga. Con la bobina de potencial conectada al punto  $A$  de la figura 4-36, el voltaje de carga es medido correctamente, pero la corriente a través de las bobinas de campo es mayor por una cantidad  $i_p$ . El wattímetro por lo tanto da una lectura mayor por la cantidad de potencia perdida en el circuito de potencial. Sin embargo, si la bobina de potencial se conecta al punto  $B$  de la figura 4-38, la bobina de campo mide la corriente de carga correcta, pero el voltaje a través de la bobina de potencial es mayor por la cantidad que cae en la bobina de campo. El wattímetro de nuevo dará una lectura mayor, pero ahora por la cantidad de  $I^2 R$  perdida en los devanados del campo. La elección de la conexión correcta depende del caso. En términos generales, la conexión de la bobina de potencial al punto  $A$  es conveniente cuando se tienen cargas de alta corriente y bajo voltaje; la conexión en el punto  $B$  se utiliza en cargas de baja corriente y alto voltaje.

La dificultad de colocar la conexión de la bobina de potencial se supera en el wattímetro *compensado* mostrado esquemáticamente en la figura 4-37. La bobina de corriente consiste en dos devanados, cada uno con el mismo número de vueltas. Uno está construido con alambre grueso y conduce la corriente de carga, más la corriente de la bobina de potencial. El otro devanado se construye con alambre delgado y sólo circula la corriente de la bobina de voltaje. Esta corriente va en dirección opuesta a la corriente en el devanado de alambre grueso, con lo que su flujo se opone al flujo principal. El efecto de  $i_p$  se cancela y el wattímetro indica la potencia correcta.

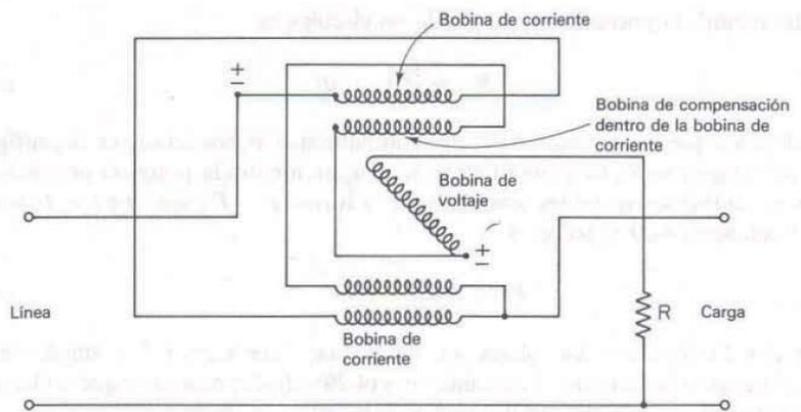


Figura 4-37. Diagrama de un wattímetro compensado en el cual el efecto de la corriente en la bobina de potencial es cancelado por la corriente en el devanado de compensación.

### 3.2.4 Medidores de factor de potencia.

Por definición, el factor de potencia es el coseno del ángulo de fase entre el voltaje y la corriente; por lo que la medición se realiza a partir de dicho ángulo de fase. Esto se demuestra en la operación del *medidor de factor de potencia de bobinas cruzadas*. El instrumento es básicamente un movimiento de electrodinamómetro, donde el elemento móvil consiste en dos bobinas montadas en el mismo eje, pero con un ángulo recto entre ellas. La bobina móvil gira en el campo magnético producido por la bobina de campo que conduce la corriente de la línea.

Las conexiones para este medidor en un circuito monofásico se muestran en el diagrama del circuito de la figura 4-40. La bobina de campo se conecta en serie con la línea y conduce la corriente de línea. Una de las bobinas móviles está conectada en serie con una *resistencia* a través de las líneas y recibe corriente de la diferencia de potencial aplicado. La segunda bobina del elemento móvil está conectada en serie con un *inductor* también a través de las líneas. Dado que no se utilizan resortes de control, el balance del elemento móvil depende del par resultante desarrollado por las dos bobinas cruzadas. Cuando el elemento móvil está balanceado la contribución del par total de cada uno de los elementos debe ser igual pero de signo opuesto. El par desarrollado en cada bobina es función de la corriente a través de ellas y por lo tanto, depende de la impedancia en cada circuito de la bobina. El par también es proporcional a la inductancia mutua entre cada par de bobinas cruzadas y la bobina de campo estacionaria. Esta impedancia mutua depende de la posición angular de los elementos de las bobinas cruzadas respecto a la posición de la bobina de campo estacionario. Se puede demostrar que cuando el elemento móvil está equilibrado, su desplazamiento angular es una función del ángulo de fase entre la corriente de línea (bobina de campo) y el voltaje de línea (bobinas cruzadas). La indicación de la aguja, la cual está unida al elemento móvil, se calibra en términos del ángulo de fase o del factor de potencia

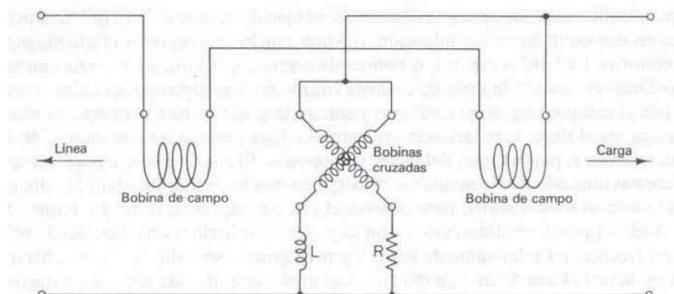
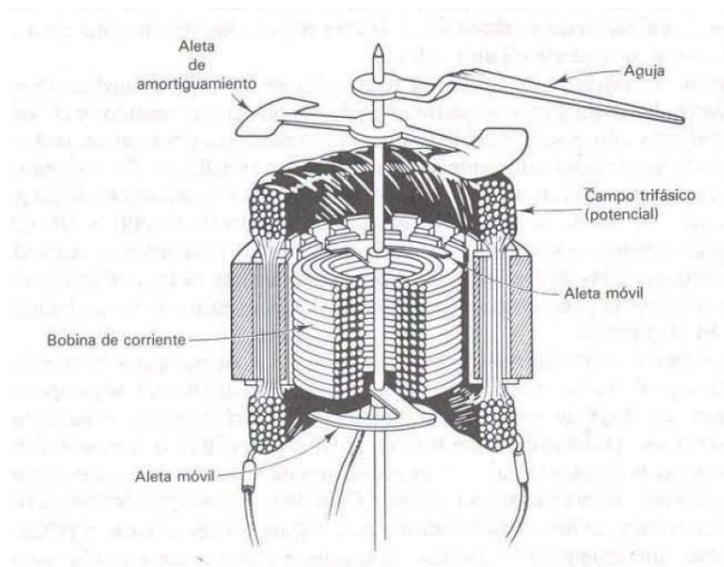


Figura 4-40. Conexiones de un medidor de factor de potencia monofásico de bobinas cruzadas.

La construcción del *medidor de factor de potencia de aleta polarizada* se muestra en la figura 4-41. Este instrumento es utilizado en sistemas de energía trifásica, ya que su principio de operación depende de la aplicación de voltajes trifásicos. La bobina exterior es la bobina de potencial, la cual está conectada a la línea trifásica del sistema. La aplicación del voltaje trifásico a la bobina de potencial hace que ésta actúe como estator de un motor de inducción trifásico, con lo cual se crea un *flujo magnético rotatorio*. La bobina central, o bobina de corriente, se conecta en serie con una de las líneas de fase y ésta *polariza* las aletas de hierro. Las aletas polarizadas se mueven por el campo magnético rotatorio y toman la posición que el campo rotatorio tiene cuando el flujo de polarización es máximo. Esta posición es una indicación del ángulo de fase y, por lo tanto, del factor de potencia. El instrumento se puede utilizar en sistemas monofásicos, con una red de desplazamiento de fase (similar a la utilizada en los motores monofásicos) para obtener el campo magnético rotatorio requerido.



**Figura 4-41. Medidor de factor de potencia tipo aleta polarizada.**

Ambos tipos de medidores de factor de potencia se limitan a mediciones de señales con frecuencias relativamente bajas y por lo general se utilizan con la señal a la frecuencia de la línea de energía (60 Hz). Las mediciones de fase a mayores frecuencias suelen ser más exactas y mejor realizadas cuando se emplean técnicas o instrumentos electrónicos especiales.

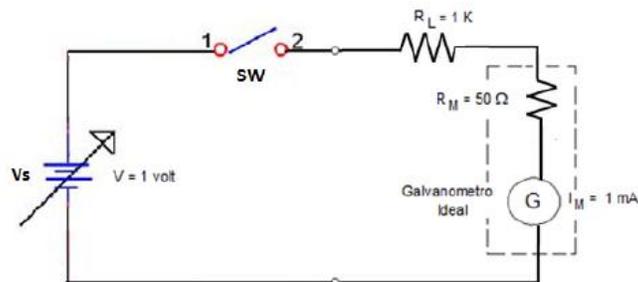
### 3.3. Efecto de carga de los instrumentos en las mediciones.

#### 3.3.1. Impedancia de los instrumentos de medición.

##### 3.3.1.1 Error por efecto de carga del amperímetro.

La resistencia interna de la bobina del medidor introduce una desviación con respecto al comportamiento de un amperímetro ideal. Un amperímetro ideal debe ser capaz de efectuar la medición sin cambiar o perturbar la corriente en la rama. Sin embargo, los amperímetros reales poseen siempre resistencia interna  $R_M$  y hacen que la corriente en la rama cambie debido a la inserción del medidor. Utilizando este modelo, podemos calcular el error que se causa al introducir un amperímetro en un circuito o podemos especificar la máxima resistencia que debe tener el amperímetro de tal forma que no tenga efectos apreciables en el circuito. La resistencia adicional serie introducida por el amperímetro origina que fluya menos corriente en la rama del circuito.

#### Ejemplo 3.1



Se mide la corriente que en un circuito que tiene una resistencia de  $1\text{ K}\Omega$  con un amperímetro de  $1\text{ mA}$  que tiene una resistencia interna de  $50\ \Omega$ . Calcúlese el error introducido por la resistencia adicional del amperímetro en el circuito.

#### Solución:

a) Si en el circuito mostrado no se considera el amperímetro y se tiene  $1\text{ V}$  aplicado a la resistencia de  $1\text{ K}\Omega$ , se producirá una corriente de:

$$I_{\text{real}} = \frac{V}{R_1} = \frac{1}{1\text{k}} = 1\text{mA}$$

b) Cuando se conecta el amperímetro en serie con esa resistencia, la resistencia total de la rama es de  $1.050\text{ K}\Omega$ . Así, si se aplica  $1\text{ V}$ , se tendrá una corriente de

$$I_{\text{medida}} = \frac{V}{R_1 + R_M} = \frac{1}{1.050\text{k}} = 0.95\text{mA}$$

c) El error en la lectura originado por  $R_M$  del amperímetro es

$$\% \text{ Error} = \frac{I_{\text{real}} - I_{\text{medida}}}{I_{\text{real}}} \times 100\% = 5\%$$

##### 3.3.1.2 Error por efecto de carga del voltímetro.

La sensibilidad de un voltímetro se puede especificar utilizando la definición general dada al concepto, que sería el voltaje necesario para la deflexión de escala completa. Pero aquí se usa ampliamente otro criterio de sensibilidad, que es la cantidad de ohms por unidad de voltaje (especifica la impedancia de entrada que ofrece el instrumento por cada unidad de voltaje). Para cada rango de voltaje, la resistencia total ofrecida por el voltímetro,  $R_T$ , se divide por el voltaje a plena escala y el cociente se llama sensibilidad. Este cociente es una constante del voltímetro. El valor de la sensibilidad  $S$  se puede calcular como el recíproco de la sensibilidad de corriente del galvanómetro usado en el voltímetro.

### Ejemplo 3.2.

Se quiere medir el voltaje a través de la resistencia  $R_2$  de 10 K $\Omega$  del circuito de la Figura 4-15. Se tienen dos voltímetros para hacer la medición. El voltímetro **A** tiene una sensibilidad de 1000  $\Omega/V$  y el voltímetro **B** tiene una sensibilidad de 20 000  $\Omega/V$ . Ambos utilizan una escala de 50 V. Calcular (a) la lectura de cada medidor y (b) el error con respecto a la lectura verdadera.

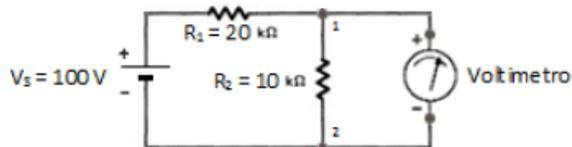


Figura 4-15

**Solución:** La lectura verdadera debe ser

$$V_T = \frac{V_S}{R_1 + R_2} R_2 = \frac{100}{20K + 10K} \cdot 10K = 33.3 \text{ V}$$

El voltímetro **A** tiene una sensibilidad de 1000  $\Omega/V$ , por lo que su resistencia interna  $R_r$  es 50.000 cuando utiliza su escala de 50 V. La resistencia total entre el punto 1 y el punto 2 con el voltímetro conectado se encuentra a partir de:

$$R_{12} = \frac{(10K)(50K)}{10K + 50K} = 8.3 \text{ K}\Omega$$

La resistencia total  $R_T$  del circuito es  $R_T = R_1 + R_{12} = 28 \text{ 300}$ . Por tanto el voltaje entre los puntos 1 y 2 de la Figura 4-15 indicado por el voltímetro es

$$V_{12} = V_S \frac{R_{12}}{R_T} = 100 \frac{8300}{28300} = 29.0 \text{ V}$$

El error de esta medición

$$\% \text{ Error} = \frac{33.3 - 29.0}{33.3} \cdot 100\% = 13\%$$

El voltímetro **B** tiene una sensibilidad de 20 000  $\Omega/V$ , entonces su resistencia equivalente es

$$R_T = 50 \times 20 \text{ 000} = 1 \text{ M}\Omega.$$

Luego

$$R_{12} = \frac{(10K)(1M)}{10K + 1M} = 9.9 \text{ K}\Omega$$

De esta forma  $R_T = 29 \text{ 000 } \Omega$  y voltímetro indica

$$V_{12} = V_S \frac{R_{12}}{R_T} = 100 \frac{9900}{29900} = 33.1 \text{ V}$$

Con un error de

$$\% \text{ Error} = \frac{33.3 - 33.1}{33.3} \cdot 100\% = 0.6\%$$

El ejemplo muestra que el voltímetro con la relación ohmios/voltio más alta dará la lectura más confiable, a causa del error por efecto de carga. Podemos determinar la sensibilidad que un voltímetro debe tener para reducir el error hasta un determinado porcentaje de la lectura verdadera. Se hace señalar también que el error por efecto de carga puede ocurrir cuando se trate de medir voltajes en circuitos de alta resistencia. En estos casos, únicamente se pueden obtener lecturas exactas con voltímetros electrónicos los cuales tienen resistencias de entrada del orden de 10 M $\Omega$  o más. Como regla general, se tiene que para reducir el error por efecto de carga en las lecturas del voltímetro a menos del uno por ciento, la resistencia del voltímetro

debe ser por lo menos 100 veces más grande que la resistencia del circuito a través del cual se está midiendo el voltaje.

### 3.3.1.2 Impedancia de salida del generador de funciones.

Vamos a ver cómo podemos medir la impedancia de salida de un generador de funciones. Un óhmetro no puede utilizarse directamente, pues la fuente debe de estar encendida durante la medida. El circuito equivalente de Thévenin de la fuente lo podemos ver en la figura 19.

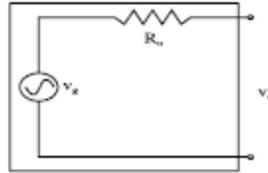


Figura 19

La tensión  $v_g$  de la fuente puede obtenerse midiendo el voltaje a la salida del generador en condiciones de circuito abierto. Para ello se conecta el aparato de medida directamente a los bornes de salida del generador. Si la impedancia del aparato de medida es mucho mayor que la impedancia de salida (efecto de carga despreciable) el valor medido,  $v_o$ , se puede considerar como la tensión  $v_g$  (suponiendo que el aparato de medida está bien calibrado y estoy midiendo dentro de su ancho de banda). En caso contrario será necesario compensar el efecto de carga del aparato.

A continuación colocamos una resistencia  $R_L$  de valor conocido a la salida (figura 20).

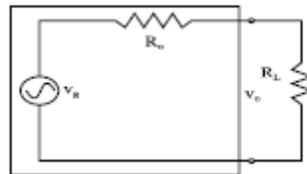


Figura 20

El valor obtenido ahora de  $v_o$  es menor o igual que  $v_g$ . Si  $R_L \gg R_o$ , la tensión  $v_o$  es prácticamente igual a  $v_g$ . Si por el contrario  $R_o \gg R_L$  la tensión  $v_o$  medida es una fracción de  $v_g$ .

Una alternativa práctica sería utilizar un potenciómetro y ajustar éste hasta obtener una tensión de salida del orden deseado (como criterio **práctico** se puede utilizar que la tensión  $v_o$  esté comprendida entre 50%-90% de la tensión  $v_g$ ).

Para obtener el valor  $R_o$  basta con aplicar la ecuación (27).

$$R_o = R_L \left[ \frac{v_g}{v_o} - 1 \right] \quad (27)$$

La impedancia de salida de un dispositivo como filtro o amplificador se puede medir colocando el generador de funciones a la entrada del dispositivo.

### Ejemplo 3.3.

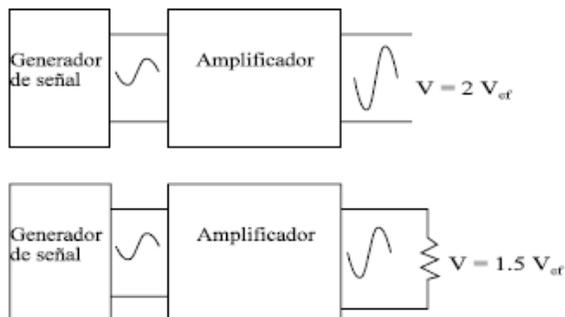


Figura 21

Calcular la impedancia de salida del filtro de figura 21 si la resistencia de carga puesta a la salida es de 1 K $\Omega$ . Podemos considerar al conjunto del generador más amplificador como un generador. En este caso, la tensión a la salida en condiciones de circuito abierto es de 2 voltios eficaces. La tensión a la salida del conjunto cuando utilizó una resistencia de 1 K $\Omega$  es de 1.5 V<sub>ef</sub>. Basta con aplicar la ecuación (27) para obtener el valor de la resistencia de salida

$$R_o = 1000 \left[ \frac{2}{1.5} - 1 \right] \Omega$$

Este método de medida de la impedancia de salida de un dispositivo, es aplicable tanto con corriente continua como con corriente alterna. Si la corriente es continua la impedancia de salida debe de ser de tipo resistivo puro. Si estoy trabajando con corrientes alternas pueden aparecer términos inductivos y capacitivos dependientes de la frecuencia, lo que hace que la impedancia medida dependa de la frecuencia a la cual se realiza la medida.

### 3.3.2. Sondas o puntas de prueba.

Las puntas de prueba o también llamadas sondas se construyen para que tengan un efecto mínimo sobre el circuito de medida, esto es evitar cargar al circuito en donde se realiza la medición. Esta facultad de las sondas recibe el nombre de efecto de carga, para minimizarla se utiliza un atenuador pasivo, generalmente de x10.

Este tipo de sonda se proporciona generalmente con el osciloscopio y es una excelente sonda de utilización general. Para otros tipos de medidas se utilizan sondas especiales, como pueden ser las sondas de corriente o las activas.

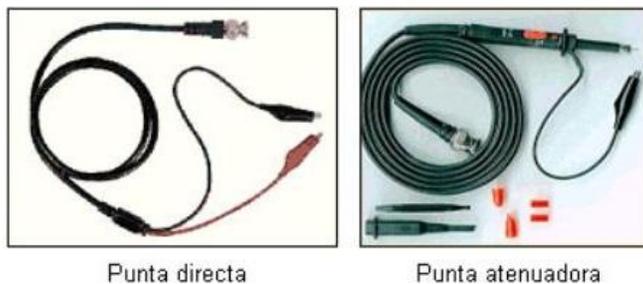


Figura 15.1. Puntas comunes para osciloscopios.

### 3.3.2.1 Mantenimiento.

Antes de desarmar o desensamblar su punta asegúrese de que no esté conectada a ningún a fuente de voltaje. La cabeza de la punta de prueba puede ser desconectada y separada del cable con solo jalar el cable con el conector, eso permite reemplazar el cable o la cabeza cuando alguno está dañado. La punta de medición es también reemplazable; para reemplazar una punta rota desenrosque la parte plástica que sujeta la punta y sustituya por una nueva teniendo cuidado de alinear con el contacto interno.

### 3.3.2.2 Ajustes de compensación.

Para calibrar la punta (compensación de la punta) se deben seguir los siguientes pasos:

1. Conectar la sonda a la entrada del canal I, fijándose si se encuentra en x1 o x10. (Fig.15.2)
2. Conectar la punta de la sonda al punto de señal de compensación (La mayoría de los osciloscopios disponen de una toma para ajustar las sondas, en caso contrario será necesario utilizar un generador de onda cuadrada).
3. Conectar la pinza de cocodrilo de la sonda a masa, opcional ya que las masas de ambos canales están conectadas.
4. Observar la señal cuadrada de referencia en la pantalla
5. Si el osciloscopio tiene alguna rutina de calibración, ejecutarla para lograr mayor precisión. Es decir, manejar base de tiempo y perilla de atenuación del respectivo canal V/div (Voltios por divisiones).
6. Usar la herramienta de ajuste proporcionada por el fabricante o un elemento no magnético (en general un destornillador de plástico) para ajustar el condensador variable de la punta atenuadora de tal manera que la onda cuadrada no contenga distorsión, tal como se muestra en la figura 15.3.

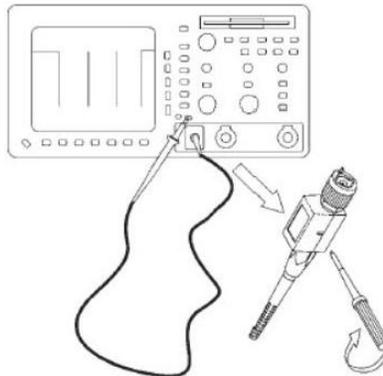


Figura 15.2. Calibración de las puntas de prueba.

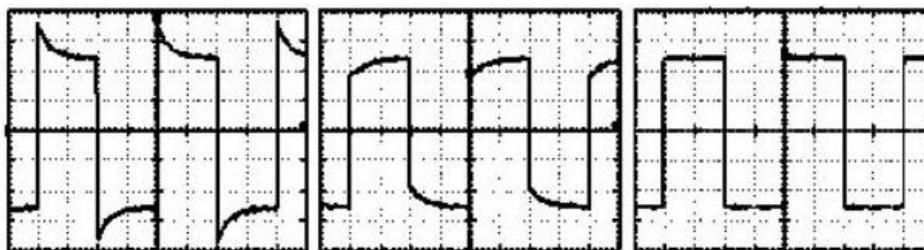


Figura 15.3. Punta atenuadora sobrecompensada, subcompensada y correctamente compensada.

## Contenido

Unidad III .....	152
Medición de parámetros .....	152
3.1. Medición y prueba de dispositivos y elementos. ....	152
3.1.1. Resistencias. ....	152
3.1.2 Conductividad y resistencia eléctrica. ....	152
3.1.3 Las resistencias eléctricas comerciales.....	155
3.1.3.1 Clasificación de las resistencias por su valor: .....	155
3.1.3.2 Clasificación de las resistencias por su construcción: .....	155
3.1.3.2.1 Resistencias de hilo bobinado.- .....	155
3.1.3.2.2 Resistencias de carbón prensado.- .....	156
3.1.3.2.3 Resistencias de película de carbón.- .....	156
3.1.3.2.4 Las Resistencias de película metálica. ....	157
3.1.3.2.5 Resistencias de hilo o bobinadas.....	157
3.1.3.2.6 Resistencias de película de óxido metálico.- .....	158
3.1.3.2.7 Resistencias de metal vidriado.- .....	158
3.1.3.3 Valores nominales de una resistencia eléctrica.....	158
3.1.3.4 Empleo del código colores para obtener el valor nominal de la resistencia y tolerancia de una resistencia eléctrica.....	159
3.1.3.5 Medición de resistencia por el método de amperímetro-voltímetro .....	161
3.1.3.5.1 Conexión Corta .....	161
3.1.3.5.2 Conexión Larga .....	162
3.1.4 Errores en las mediciones.....	163
3.1.4.1 Error metodológico .....	163
3.1.5 Puentes de Medición .....	163
3.1.5.1 Puente de Wheatstone.....	164
3.1.5.1.1 Operación básica .....	164
3.1.5.1.2 Errores de medición .....	165
3.1.5.1.3 Circuito equivalente Thévenin.....	165
3.1.5.2 Puente Kelvin.....	169
3.1.5.2.1 Puente doble Kelvin.....	170
3.1.5.2.2 Resistencia de tres terminales.....	172
3.1.2. Medición de capacitancia e inductancia. ....	174
3.1.2.1 Medición de capacitancia en c.d. ....	174
3.1.2.1.1 Tipos de condensadores.....	175

3.1.2.1.2 Identificación de los condensadores. ....	176
3.1.2.1.3 Medición de capacitancia en c.d. con un multímetro digital. ....	177
3.1.2.1.4 Visión general de la medición de capacitancia.....	178
3.1.2.2 Medición de Inductancia. ....	178
3.1.2.2.1 Unidad de medida de la inductancia. ....	179
3.1.2.2.2 Clasificación.....	179
3.1.2.2.3 Codificación.....	180
3.1.2.2.4 Valores Estándares.....	180
3.1.2.2.5 Criterios de Selección.....	180
3.1.2.2.6 Cálculos de inductancia.....	180
3.1.3 Mediciones con puentes. ....	181
3.1.3.1 Intensidad de corriente y tensión senoidales.....	181
3.1.3.2 Impedancia.....	181
3.1.3.3 Ángulo de fase. ....	182
3.1.3.4 Impedancia compleja. ....	183
3.1.3.5 Distintas formas de expresar un número complejo. ....	184
3.1.3.6 Condiciones para el equilibrio del puente de c.a. ....	185
3.1.3.7 Aplicación de las ecuaciones de equilibrio. ....	186
3.1.3.7.1 Puente Maxwell.....	187
3.1.3.7.2 Puente Hay. ....	189
3.1.3.7.3 Puente Schering.....	190
3.1.3.7.4 Puente Wien. ....	194
3.1.4. Prueba de dispositivos semiconductores. ....	196
3.1.4.1 El diodo semiconductor. ....	196
3.1.4.1.1 La teoría del diodo.....	196
3.1.4.1.2 Pruebas con el diodo.....	197
3.1.4.2 Pruebas con los transistores.....	198
3.1.4.2.1 Cómo se puede determinar cuál es la base de un transistor:.....	199
3.1.4.2.2 Uso del multímetro analógico. ....	202
3.2 Medición de potencia y energía. ....	204
3.2.1 Trabajo y Potencia eléctrica c.d.....	204
3.2.2 Electrodinómetro. ....	205
3.2.3 Electrodinómetros en mediciones de potencia.....	207
3.2.4 Medidores de factor de potencia. ....	210
3.3. Efecto de carga de los instrumentos en las mediciones.....	212
3.3.1. Impedancia de los instrumentos de medición. ....	212
3.3.1.1 Error por efecto de carga del amperímetro. ....	212
Ejemplo 3.1.....	212
3.3.1.2 Error por efecto de carga del voltímetro.....	212

Ejemplo 3.2.....	213
3.3.1.2 Impedancia de salida del generador de funciones.....	214
Ejemplo 3.3.....	215
3.3.2. Sondas o puntas de prueba.....	215
3.3.2.1 Mantenimiento.....	216
3.3.2.2 Ajustes de compensación.....	216

## Unidad 4<sup>1</sup>

### Instrumentos especiales y virtuales

El mayor peligro no es que nuestra meta sea demasiado alta y no la alcancemos, sino que sea demasiado baja y la consigamos.

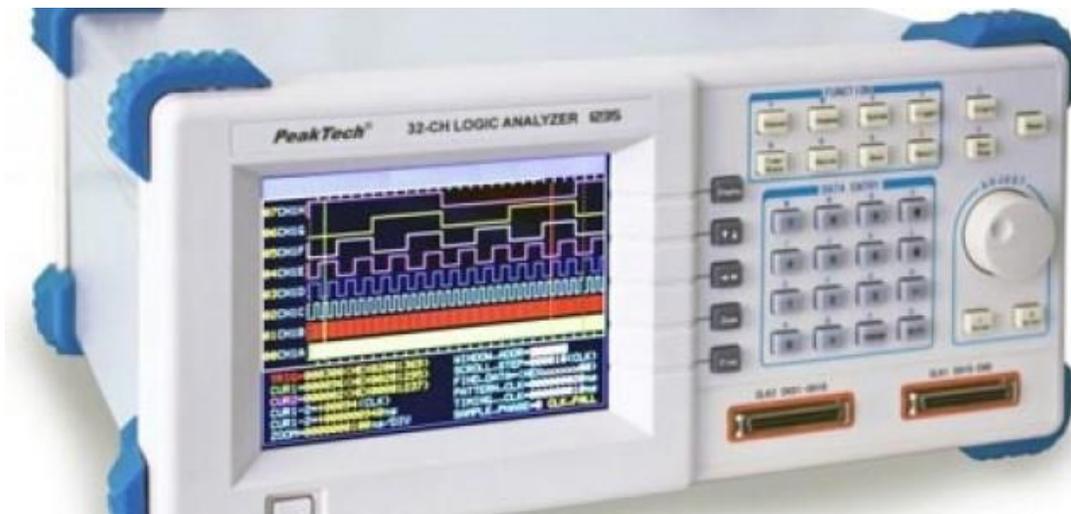
Miguel Ángel:

- 4.1. Analizador de estados lógicos.
- 4.2. Analizador de espectros.
- 4.3. Equipos especiales de medición.
  - 4.3.1. Gráficos.
  - 4.3.2. Trazador de curvas.
  - 4.3.3. Luxómetro.
  - 4.3.4. Tacómetro.
  - 4.3.5. Medidores de campo magnético.
  - 4.3.6. Analizador de Fourier
- 4.4. Introducción al manejo de instrumentos virtuales

#### 4.1 Analizador de estados lógicos.

##### 4.1.1 El Analizador Lógico

La rápida evolución de los sistemas electrónicos digitales creó la necesidad de una nueva generación de instrumentos, ya que los sistemas tradicionales de medida no podrían analizar por completo estos sistemas. Junto con la aparición del primer microprocesador, a finales de los años 60 se produjo también la de los primeros analizadores.



Con la introducción de sistemas con buses<sup>2</sup>, especialmente aquellos basados en microprocesadores, el número de señales se ha incrementado de forma notable; además, estas señales no deben ser medidas individualmente

<sup>1</sup> Apegado al programa de la asignatura actualizado, según CIRCULAR No. M00.2.1/014/2016 del Tec.N.M. 06/06/ 2016.

<sup>2</sup> Es un bus en el cual los datos son enviados por bytes al mismo tiempo, con la ayuda de varias líneas que tienen funciones fijas. La cantidad de datos enviada es bastante grande con una frecuencia moderada y es igual al ancho de los datos por la frecuencia de funcionamiento. En las computadoras ha sido usado de manera intensiva, desde el bus del procesador, los buses de discos duros, tarjetas de expansión y de vídeo, hasta las impresoras.

porque solo tienen sentido en relación a las demás y formando un conjunto con ellas. En consecuencia, esta tarea ya no puede ser resuelta con un clásico instrumento de medida como puede ser el osciloscopio.

La importancia de ver todas las señales simultáneamente queda clara si nos referimos al ciclo de lectura de un microprocesador, por ejemplo, de 16 bits. Para verificar que estos bits de datos son leídos correctamente de la memoria es necesario valorar cerca de 48 canales a la vez.

De esta manera podemos observar que ciertas situaciones, en relación a operaciones con microprocesadores, pueden ser explicadas solo si todas las líneas de dirección y datos se muestran junto con las señales de control relacionadas en esa operación.

El aspecto exterior de un analizador lógico es similar al de un osciloscopio, aunque el número de mandos o controles externos que podemos visualizar es bastante superior en el del primero. La presentación de datos, tanto en el caso de diagramas de estado como de tiempos, se realiza a través de displays LCD a color. Interiormente, su componente principal es un microprocesador, el cual gobernará todas las funciones que nos permita en analizador lógico.

Típicamente la función principal de los analizadores lógicos es la captación de niveles altos y bajos sobre una referencia de tiempo común, esto puede significar 8, 16, 32, 48 o más entradas, conocidas como canales. Los datos no son registrados continuamente sino muestreados<sup>3</sup>; la velocidad de muestreo viene determinada por el reloj y se da, por ejemplo, en cada flanco de subida del impulso de reloj. Los datos muestreados son almacenados de forma digital en una memoria. Con una operación multicanal y una velocidad de muestreo alta se puede obtener gran cantidad de información que se almacena en memoria. Con, por ejemplo, 16 canales y un reloj trabajando a 20 MHz. se pueden obtener 320 millones de muestras por segundo. De este modo aunque haya una gran memoria se llena pronto. Por esta razón, se utiliza un disparo selectivo de manera que los datos sólo se almacenan para la zona de trabajo que interesa. El disparo se realiza mediante una secuencia de palabras de datos predeterminada, es decir, cuando la señal de entrada desde una entrada particular sea igual a la palabra de datos introducida en el teclado por el operador. El término *palabra* se utiliza para designar una colección de números binarios. El pre- y postdisparo se utilizan para almacenar datos inmediatamente antes o después de la palabra indicada. Un mayor refinamiento puede ser el disparo múltiple, es decir, se utiliza más de una palabra de disparo y todas ellas se deben recibir antes de la captura de datos. Otra posibilidad es el disparo de eventos secuenciales, cuando se requiere una secuencia de palabras antes de capturar los datos.

---

<sup>3</sup> Los parámetros más importantes de una medida son el tiempo de muestreo y la condición de disparo. El tiempo de muestreo es el tiempo que transcurre entre dos lecturas consecutivas de los canales de entrada. Es importante que este tiempo se ajuste a la variación que va a sufrir la señal. Es decir, si la señal puede contener pulsos de 1 ms de duración, el tiempo de muestreo no deberá ser mayor que ese valor, pues se podría ocultar ese pulso. La condición de disparo es la señal que inicia el registro o almacenamiento de los datos, lo que continúa hasta que se llena el buffer o la memoria interna del instrumento

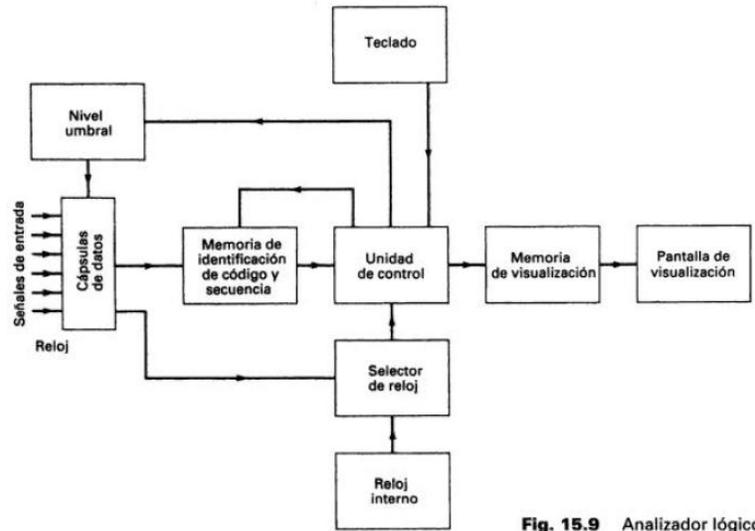


Fig. 15.9 Analizador lógico

Figura 4.1 Diagrama a bloques de un Analizador lógico.

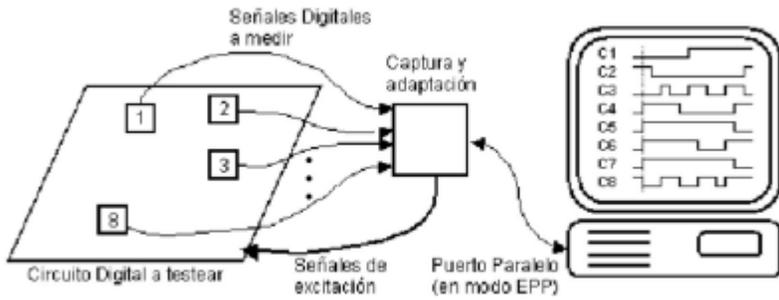


Figura 4.2 Circuito de captura y conversión:

La figura 4.1 muestra el diagrama de bloques básico de un analizador lógico. Las señales de entrada se conectan al analizador a través *cápsulas* (pods). Estas son módulos de interfaz que se han diseñado para proporcionar las conexiones eléctricas y mecánicas necesarias al dispositivo bajo test, para captar la señal sin interferencias de acoplamiento, es decir, señales de interferencia de otras líneas de entrada, y convertir el dato de forma que el analizador pueda entenderlo. Las entradas de datos a las cápsulas se comparan frente a un nivel umbral que configura el estado lógico 0 y el estado lógico 1. Los datos están entonces sujetos a un disparo selectivo en una memoria de identificación de código y secuencia. El nivel umbral, y la memoria de identificación de código y secuencia se controlan mediante una entrada de teclado conectada a la unidad de control. Ésta coordina todas las operaciones del instrumento, almacena los datos requeridos en memoria y los pasa para su visualización, en el formato adecuado, en un display propio del instrumento o de una PC. El reloj utilizado para la unidad de control puede ser un reloj interno o una señal de reloj desde la unidad bajo prueba. Cuando se utiliza el reloj interno, el analizador trabaja en lo que se conoce como *modo asíncrono*. La frecuencia del reloj interno, es decir, la frecuencia con que sucede el muestreo, debe ser al menos cuatro veces mayor que la del reloj de la unidad bajo prueba si no se quieren perder estados lógicos. Cuando se utiliza la señal de reloj del dispositivo a comprobar, el analizador trabaja en *modo síncrono*. En este modo la adquisición de datos ocurre sincrónicamente con el reloj de la unidad bajo prueba. La ventaja del modo asíncrono es que los datos se muestrean más rápidamente y, por tanto, hay más posibilidades de capturar *glitches* (impulsos aleatorios de corta duración). Los «glitches» no son señales debidas a los datos sino alguna forma de corrupción de la línea de entrada. Se muestran como picos de corta duración. Una frecuencia de reloj de 100 MHz puede capturar y visualizar «glitches» e impulsos de datos de alrededor de 10 ns de duración. El modo síncrono tiene la ventaja de tomar las muestras de estado lógico en cada ciclo de reloj de la unidad bajo prueba.

#### 4.1.2 Modos de muestreo en analizadores lógicos.

Existen dos modos de funcionamiento típicos en un analizador lógico dependiendo del modo de muestreo utilizado.

- **Muestreo asíncrono (timing analyzer mode).** Es un modo de trabajo similar al de un DSO (*Digital Storage Oscilloscope*). El analizador muestra gráficos de múltiples entradas verticales con un eje horizontal común que representa el tiempo (timing o cronograma). La información de los canales de entrada se muestrean a partir de una señal de reloj interno cuya frecuencia se puede seleccionar en función de la frecuencia propia de las señales de entrada y de la profundidad de la memoria de adquisición (como en un DSO). Este modo de funcionamiento se utiliza para analizar la evolución temporal de las señales de un sistema digital.

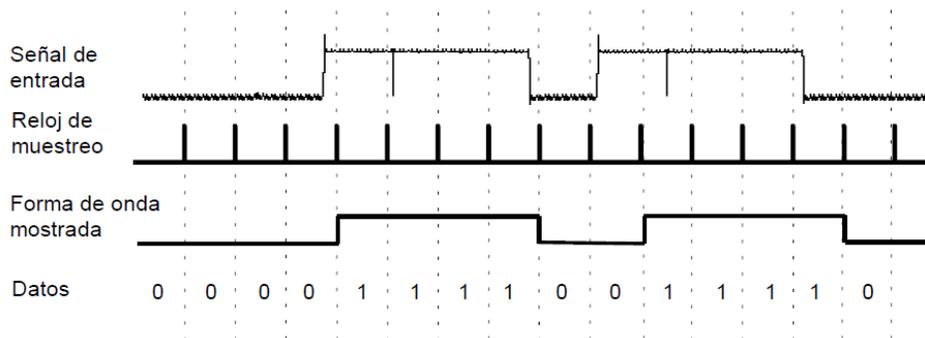


Figura 4.4. Ejemplo de medidas en modo "timing analyzer"

La exactitud de las medidas depende, por lo tanto, de la frecuencia de muestreo como se muestra en la figura 4.5. La máxima incertidumbre en tiempo coincide con el periodo del reloj de muestreo.

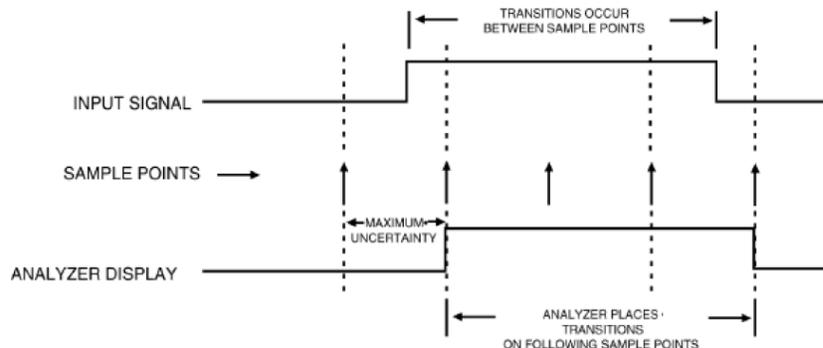


Figura 4.5. Incertidumbre en medidas en modo "timing analyzer"

**Muestreo síncrono (state analyzer mode).** Una de las señales de entrada se toma como reloj de muestreo, por lo tanto, los datos introducidos en la memoria de adquisición están determinados por las transiciones del reloj externo. Grupos predeterminados de estas entradas pueden representar variables estados del DBE (Data Bus Eneable). El analizador lógico muestra la evolución de estos estados con formatos preestablecidos componiendo tablas de estados en diversos formatos (decimal, hexadecimal, mnemotécnicos (lenguaje ensamblador), etc. Este modo es utilizado para analizar el funcionamiento de microprocesadores o dispositivos digitales específicos.

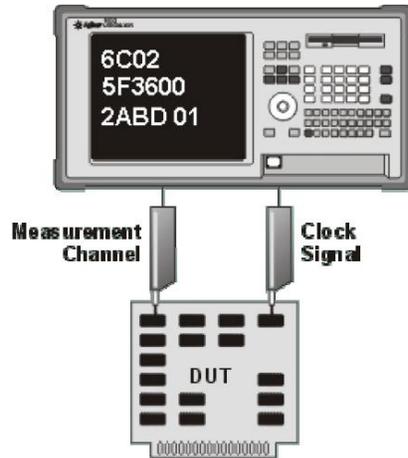


Figura 4.6. Analizador lógico en modo “state analyzer”

#### 4.1.3 Sistema de disparo.

Una vez muestreadas las señales de entrada se ha de decidir cuáles son de interés para el análisis y determinar así su registro en la memoria de adquisición. Esto se realiza gracias al sistema de disparo. En este apartado se realizará un estudio de los métodos de disparo usualmente utilizados en modo asíncrono (timing analyzer).

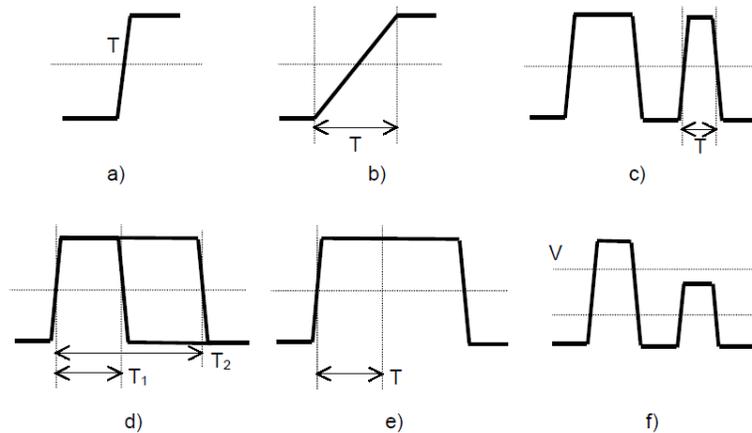


Figura 4.7. Distintos métodos de disparo.

- **Disparo por pendiente (edge triggering).** La adquisición del analizador se realiza mediante la detección de la transición positiva o negativa de una determinada señal de entrada. (figura 4.7. a)
- **Disparo por tiempo de transición (slew-rate triggering).** Sólo se activa el disparo cuando se detectan flancos con tiempos de transición mayores (o menores) que una cierta cantidad de tiempo predefinida (figura 4.7. b).
- **Disparo por transitorio (glitch triggering).** Se utiliza para detectar transitorios estrechos (glitches) que suelen ser efecto o causa de un mal funcionamiento del sistema. Para su detección se configura un tiempo T. Todo pulso de duración inferior se considerará glitch y activará el disparo del sistema (figura 4.7. c).
- **Disparo por anchura de pulso (pulse width triggering).** Es similar al método anterior. Ahora, una vez definidos los tiempos T1 y T2, sólo los pulsos de anchura mayor que T1 y menor que T2 activarán el disparo (figura 4.7. d).

- **Disparo por exceso de duración (timeout triggering).** Cuando aparecen pulsos de anchura mayor que un tiempo T predefinido el sistema se dispara (figura 4.7. e).
- **Disparo por defecto de amplitud (runt pulse triggering).** Una vez definido un determinado nivel umbral de amplitud mínima se puede disparar el sistema tras la detección de pulsos defectuosos de escasa amplitud (figura 4.7. f).
- **Disparo lógico (logic triggering).** Se determina el disparo mediante combinación lógica de dos o más señales de entrada. Se suele configurar este método de disparo introduciendo una ecuación con operadores lógicos.
- **Disparo secuenciado (setup-and-hold triggering).** Este método de disparo evalúa la posición y duración temporal relativa entre determinadas señales y la transición de otra señal de referencia. El disparo se efectúa (o no) cuando cumple el cronograma establecido por los tiempos “setup” y “hold” como se muestra en la figura 4.8.

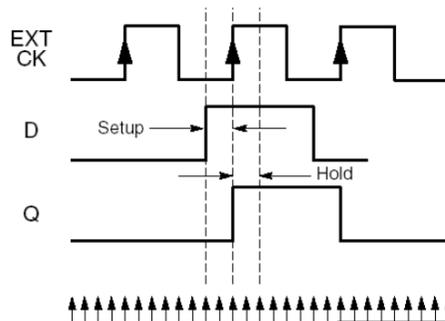


Figura 4.8. Disparo secuenciado (setup-and-hold triggering)

Uno de los principales usos de los analizadores lógicos es determinar las entradas de señal como funciones de tiempo. Por tanto, la pantalla representa las formas de onda de los niveles lógicos en función del tiempo; tales representaciones se conocen como *diagramas temporales* o *cronogramas*. Los intervalos de tiempo entre dos puntos en un cronograma pueden determinarse moviendo un cursor primero a un punto y después al siguiente. El tiempo transcurrido aparece en la pantalla. Los diagramas temporales no siempre son la mejor forma de representación para la investigación de los estados lógicos; a menudo, alternativamente, se utiliza una *tabla de estados*, que muestra los estados lógicos de cada entrada tanto en forma binaria como hexadecimal.

Con los modos de trabajo síncrono y asíncrono, los datos sólo se almacenan en memoria en los flancos activos de reloj, por ejemplo, un flanco positivo de subida. Los «glitches» de corta duración que ocurren entre impulsos de reloj, por tanto, pueden perderse. Para capturar tales «glitches», el analizador trabaja en lo que se conoce como *modo de enclavamiento*. En este modo, la frecuencia de muestreo tiene que ser más grande que la frecuencia de datos, es decir, se utiliza el reloj interno. Así, si existe más de un flanco de señal entre dos flancos de reloj, se presupone que es un «glitch». Por tanto, las señales entre dos flancos de reloj se almacenan en la memoria de un circuito de enclavamiento y se usan para provocar la visualización de un impulso completo de reloj en la traza de salida de la pantalla (fig. 4.9).

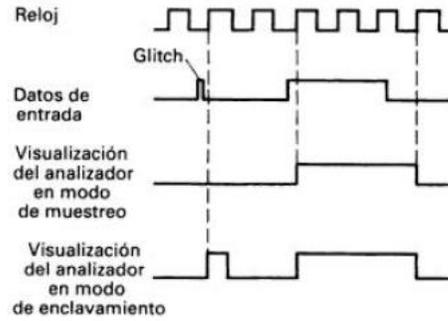


Fig. 15.10 «Glitches»

Figura 4.9 Traza de salida en la pantalla.

#### 4.1.4 Adquisición de datos.

Como se ha citado anteriormente, el proceso de almacenamiento en memoria (adquisición de datos) se realiza cuando se realiza un disparo del sistema (triggering) con el objeto de realizar el análisis de las señales seleccionadas en el intervalo de "interés": antes (pretrigger) y/o después (posttrigger) del disparo. La duración de este intervalo está limitado, entre otros factores, por el tamaño (profundidad) de la memoria de adquisición que suele ser de tipo cola anillada, es decir, cuando la memoria está llena, los datos nuevos "empujan" a los más antiguos eliminándolos de la memoria. En un modo de funcionamiento asíncrono en cada pulso del reloj se memoriza un nuevo dato. Si se persigue una buena resolución horizontal la frecuencia de reloj debe ser alta y en poco tiempo de adquisición se puede sobrepasar la capacidad de la memoria.

En el ejemplo de la figura 4.10 se observa un ejemplo con una señal tipo "ráfaga" en la que existe un porción importante de tiempo sin transiciones separando intervalos estrechos de señal con transiciones. Si la memoria es de 4096 posiciones sólo se podría adquirir la primera ráfaga de señal y la memoria estaría llena en su mayoría con datos nulos.

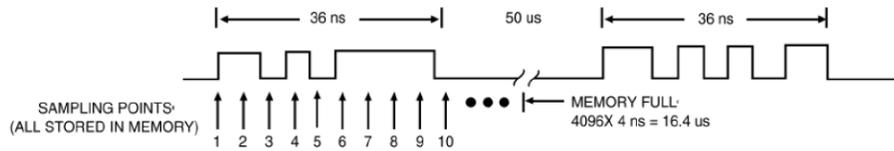


Figura 4.10. Muestreo de alta resolución no optimizado

En la figura 4.11 se muestra el método de adquisición denominado "transitional sampling" con el cual se consigue optimizar el almacenamiento de la información capturada. Consiste en guardar en memoria sólo las transiciones, mediante un detector de pendiente, y su duración, mediante un contador. En el ejemplo mostrado sería posible, mediante este método, almacenar decenas de ráfagas con tan solo 4096 posiciones de memoria.

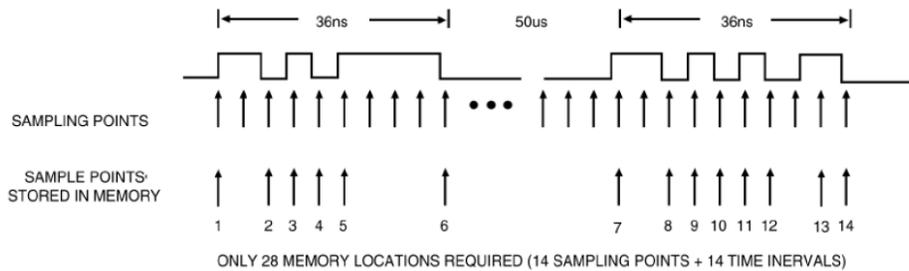


Figura 4.11. Muestreo de alta resolución con detector de transiciones

Otro método interesante de adquisición es aquel que permite capturar glitches optimizando el consumo de memoria. En la figura 4.11 se muestra su principio de funcionamiento. El glitch se detecta cuando la señal cruza el umbral de definición de estado lógico más de una vez entre instantes de muestreo. Una vez detectado, el analizador almacena este evento y lo muestra mediante una trazo discontinuo coincidente con el siguiente punto de muestreo. De este modo no es necesario incrementar la frecuencia de muestreo en exceso para la detección de glitches y por consiguiente se optimiza el uso de la memoria de adquisición.

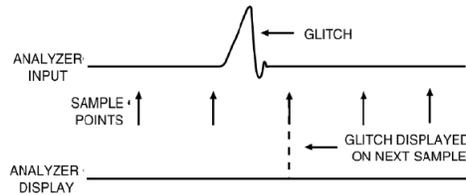


Figura 4.11 Captura de “glitches”

#### 4.1.5 Sondas y puntas de prueba.

En cada uno de los “pods” del analizador se conecta un cable plano o cilíndrico multiconductor en cuyo extremo se sitúan las sondas o puntas de prueba a conectar a los nodos de interés del DBE. En un sistema estándar para analizadores lógicos se realiza la conexión al DBE mediante micro-pinzas que se conectan normalmente a los pines de los circuitos integrados como se muestra en la figura 4.12.

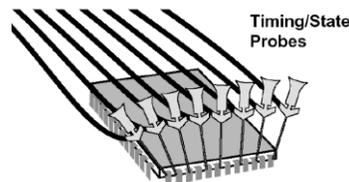


Figura 4.12. Puntas de prueba tradicionales en LA

#### 4.2 Analizador lógico USB-LOGI-500

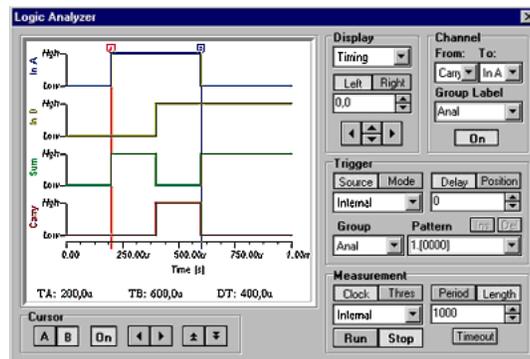


Los analizadores de estados lógicos son necesarios para el desarrollo de circuitos electrónicos. Los analizadores lógicos están conectados a los pines individuales de las puertas lógicas y son de gran ayuda en la detección de errores en el diseño de circuitos. Entre ellos está el analizador lógico USB-LOGI-500 que se utiliza para analizar procesos electrónicos en la computadora. Los analizadores lógicos están conectados a los componentes electrónicos a través de mini pinzas de cocodrilo directamente a los pines individuales. El análisis de los valores medidos se realiza en tiempo real a través del software de Windows variado. El analizador lógico dispone de un disparo (trigger) interno y externo. La medición se puede controlar por el tiempo y también por una señal externa. El analizador lógico detecta flancos subiendo y bajando y su transconductancia en tiempo real. La cuota de medición es máximo 100 MHz con trigger externo. Cada uno de los 36 canales de entrada del

analizador lógico USB-LOGI-500 trabaja con 4096 muestras (samples). El analizador lógico USB-LOGI-500 se conecta a través de una interfaz USB 2.0 al ordenador.

Con el software adicional, este tipo de analizadores lógicos puede valorar los niveles lógicos de varias maneras. Se puede ajustar, por ejemplo, diferentes cuotas de medición (velocidad de muestreo)<sup>4</sup>. Si están seleccionadas cuotas de medición externas, el circuito a analizar determina a los analizadores lógicos en que intervalo deben ser captados los niveles lógicos. Además, el software profesional ofrece la opción de seleccionar mediciones individuales en un período determinado, y también llevar a cabo mediciones continuas. Todos los datos de medición captados con los analizadores lógicos se pueden guardar y utilizar para el análisis posterior.

Con la ayuda de analizadores lógicos, es posible identificar y entender un hardware desconocido. Debido a los canales de entrada altos, es muy fácil analizar y comprender circuitos electrónicos utilizando analizadores lógicos. Esta es la principal ventaja de los analizadores lógicos en comparación con los osciloscopios estándar. Los analizadores lógicos pueden capturar circuitos muy complejos, debido a las cuotas de medición altas. Para los analizadores lógicos modernos no representan un problema conseguir cuotas de medición de hasta 500 MSamples/segundo, que corresponde a una frecuencia de 500 MHz. Debido a la conexión del analizador lógico al PC, el usuario puede guardar las curvas de medición captadas y usarlas posteriormente en otros programas. Los analizadores lógicos también pueden desmontar los canales conectados debido a su patrón de señal. De esta manera es posible un casi-software-debugging de los buses de dirección y datos.



4.13 Carátula de un analizador lógico.

### 4.3 El osciloscopio registrador-analizador lógico 1190 de PeakTech.

Debido a que a menudo la señal de prueba son señales analógicas o digitales, el usuario necesita un analizador que compruebe tanto señales analógica como también digitales, como ocurre en el osciloscopio registrador PKT-1190. Este osciloscopio dispone de un analizador lógico de 16 canales de 100 MHz. La visualización de los datos en el osciloscopio se realiza a través de una pantalla de 8" color. A través de la conexión USB puede transferir al ordenador datos con rapidez.

<sup>4</sup> **Cuota de medición:** Es la velocidad en que los analizadores lógicos captan los valores de medición. Por lo general, se especifica en Samples (muestras) por segundo.



4.14 El osciloscopio registrador-analizador lógico 1190 de PeakTech.

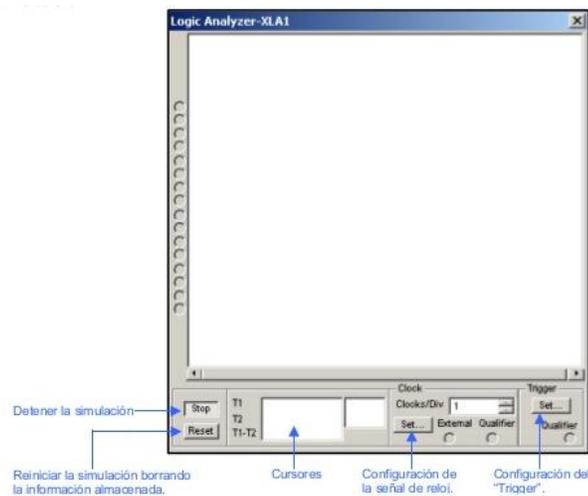
#### 4.4 Analizador lógico del programa Multisim.

El analizador lógico de Fig. 4.15 permite obtener las señales temporales de un circuito lógico, puede mostrar la representación temporal de hasta 16 señales simultáneamente. Con ayuda del analizador lógico podemos acabar de implementar cronogramas que nos ayuden a analizar el comportamiento de circuitos digitales.



Figura 4.15 Icono del analizador lógico en MULTISIM

Si hacemos ‘doble click’ encima del analizador lógico nos aparecerá una ventana Fig. 4.16 que nos permitirá modificar su configuración y visualizar la evolución temporal de las señales que tengamos conectadas a los terminales de entrada cuando iniciemos la simulación.



4.16 Pantalla del analizador lógico (MULTISIM)

La señal de reloj informará al analizador cuándo tiene que leer una muestra de la entrada. Para su configuración seleccionamos “set clock”, nos aparecerá una nueva ventana Fig. 4.17. La señal de reloj puede ser interna o externa. si elegimos interna podemos modificar su frecuencia.

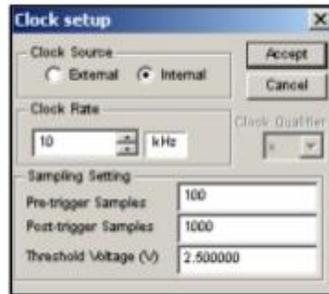


Figura 4.17 Configuración de la señal de reloj

La señal de entrada “Clock Qualifier” se utiliza para filtrar la señal del reloj. Si se fija a “x”, está deshabilitada, así que la señal del reloj determina cuando se leen las muestras. Si se fija a “1” o a “0”, se leen las muestras solamente cuando la señal del reloj coincide con la señal seleccionada del “Clock Qualifier”.

También podemos fijar el número de muestras que se visualizarán antes y después del disparo.

El analizador lógico dispone de una serie de opciones para configurar el “trigger” Fig. 4.18. Para acceder a ellas tenemos que seleccionar a “set trigger”. Dichas opciones nos permitirán seleccionar si el analizador se disparará (comenzará la visualización) cuando aparezca el primer flanco de subida, de bajada o ambos, en la señal de reloj. Mediante la opción “Pattern” se iniciará la visualización cuando tengamos en los terminales de entradas un determinado patrón o una combinación de diferentes patrones.

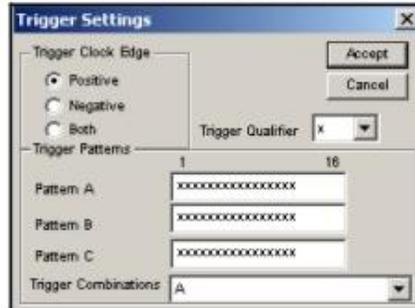


Figura 4.18 Configuración del “Trigger”

La señal de entrada “Trigger Qualifier” se utiliza para filtrar la señal de disparo “trigger”. Si se fija a “x”, está deshabilitada, así que la señal de “trigger” determina cuando se realiza el disparo. Si se fija a “1” o a “0”. el disparo se realizará solamente cuando la señal de “trigger” coincida con la señal seleccionada del “Trigger Qualifier”.

Obtener un cronograma del circuito de la Fig. 4.19, que refleje los valores de las salidas S1 y S2 para todas las posibles combinaciones de los valores de las entradas A, B y C, siendo la entrada C el bit más significativo del siguiente circuito digital implementado con un decodificador y puertas lógicas.

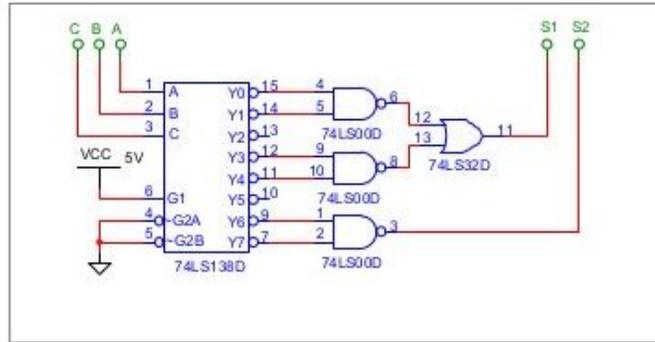


Figura 4.19 Circuito digital a analizar.

Una vez dibujado el esquema del circuito digital en el área de trabajo:

- Insertaremos los instrumentos necesarios para realizar la simulación; el generador de datos y el analizador lógico.
- A continuación conectaremos las 3 entradas A, B y C a los terminales de salida del generador de datos correspondientes a los 3 bits bajos y a los 3 primeros terminales de entrada del analizador lógico.
- Seguidamente conectaremos las dos salidas S1 y S2 a los 2 terminales siguientes del analizador lógico.

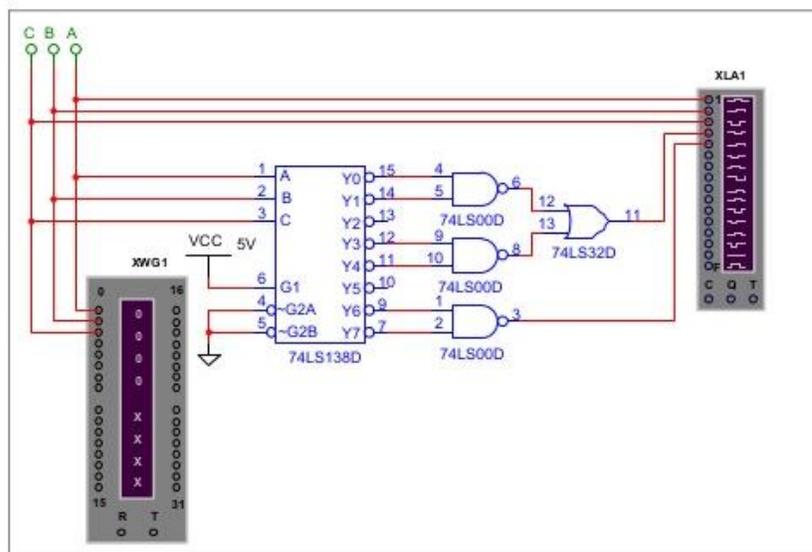


Figura 4.20 Inserción de los instrumentos empleados en la simulación.

Ahora solamente nos queda configurar los dos instrumentos, pero antes modificaremos el identificador de nodo de las tincas que hemos conectado a los terminales de entrada del analizador lógico para que las señales que obtengamos en el cronograma tengan el mismo nombre que les hemos asignado en el esquema, por defecto el programa Multisim asigna un número diferente a cada línea o nodo del esquema que dibujamos para su identificación.

Hacemos “doble click” encima de aquellas líneas que queramos modificar y cambiamos el nombre asignado a dicho nodo Fig. 4.21.

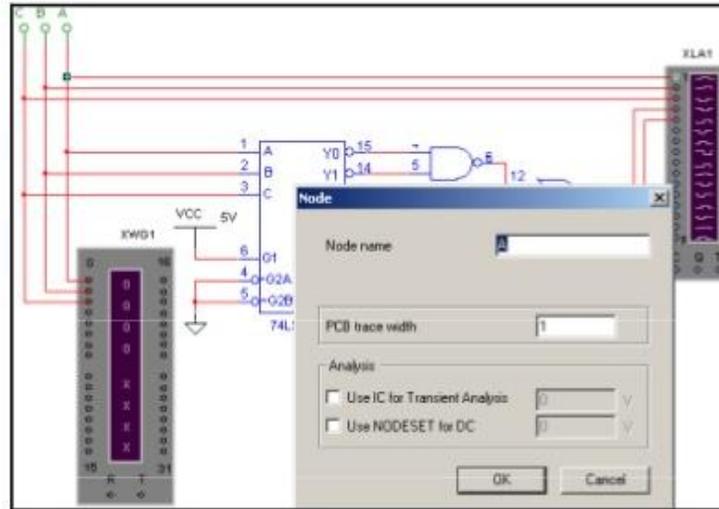


Figura 4.21 Modificación del nombre del nodo.

Tenemos que generar una secuencia de 8 palabras de 3 bits diferentes para obtener todas las posibles combinaciones que podemos aplicar en la entrada del circuito a simular Fig. 4.22, para ello:

- Entraremos en la ventana de configuración del generador de datos indicando como inicio de la secuencia la posición 0000H y como final la posición 0007H.
- Seguidamente introduciremos las 8 palabras escribiendo sus valores en cualquiera de los tres campos de representación de que disponemos ( Hexadecimal. ASCII o binario).
- Como frecuencia escogeremos 500 Hz.

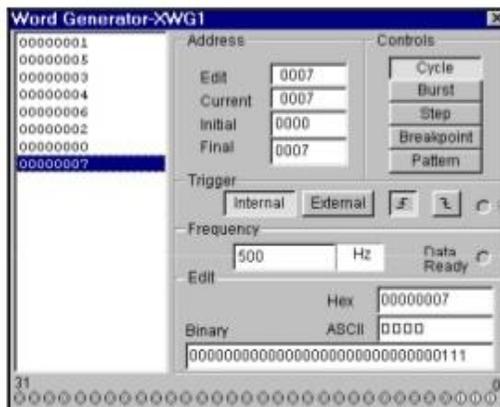
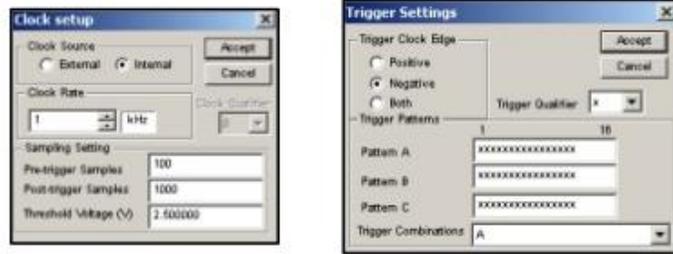


Figura 4.22 Configuración del generador de datos digitales

Para la configuración del analizador lógico, tenemos que configurar la señal de reloj y la señal de disparo ("trigger") Fig. 4.23.

- Seleccionaremos "set clock" y escogeremos la señal de reloj interna a una frecuencia de 1 KHz, ya que las señales de entrada del circuito varían a una frecuencia de 500 Hz.
- Seguidamente configuraremos la señal de disparo seleccionando "set trigger" para que se realice en el flanco descendente de la señal de reloj, de esta manera podremos visualizar correctamente las señales en el cronograma desde el momento inicial.



4.23 Configuración del analizador lógico.

Una vez hemos configurado los instrumentos iniciaremos la simulación seleccionando la opción “Burst” del generador de datos, y en la ventana de visualización del analizador lógico obtendremos un cronograma que nos reflejará el comportamiento del circuito para cada una de las combinaciones de las variables de entrada, una vez tenemos el cronograma correspondiente a la secuencia generada ya podemos detener la simulación.

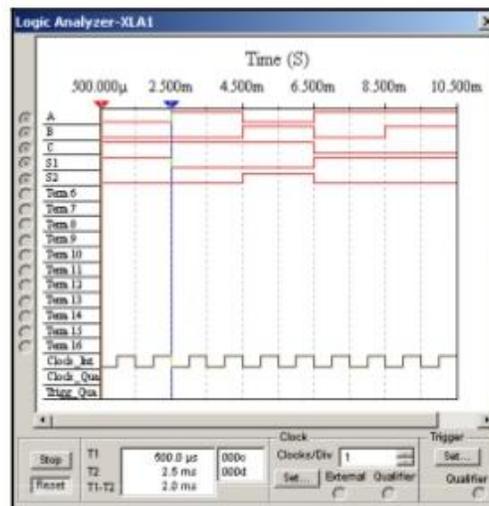


Figura 4.24 Cronograma obtenido en la simulación.

Seleccionando la opción “Show Grapher” que se encuentra en “View” podemos ver el gráfico obtenido en una nueva ventana Fig. 4.25 que nos permitirá importarlo, salvarlo en un fichero. etc...

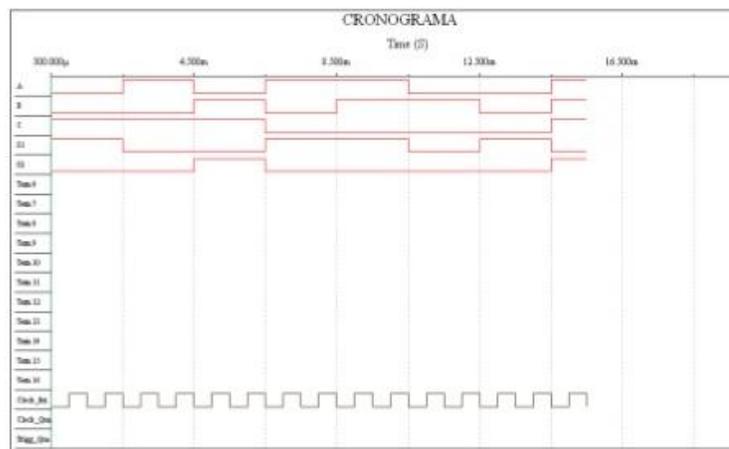


Figura 4.25 Gráfica del cronograma obtenido.

## 4.2 El Analizador de Espectro.

Previo al aprendizaje y empleo del instrumento electrónico denominado analizador de espectro, es necesario contar con conocimientos básicos en el manejo de las señales eléctricas. Dentro de esos conceptos deben estar: características de la corriente alterna sinusoidal, superposición de señales, modulación, interferencia, ancho de banda, recepción superheterodina, representación espectral de señales básicas (transformada de Fourier), visualización de señales de radiodifusión (FM comercial y TV analógica), etc.

### 4.2.1 Características de la corriente alterna sinusoidal.

Una de las posibilidades de producir c.a. sinusoidal es a través de generadores de c.a. cuyos rotores giran a cierta velocidad angular (o frecuencia angular),  $\omega$  expresada en radianes/segundo (rad/s), por lo que inducen una diferencia de potencial variable ( $fem$ ) en los devanados de las bobinas como se describe en la figura 4.26

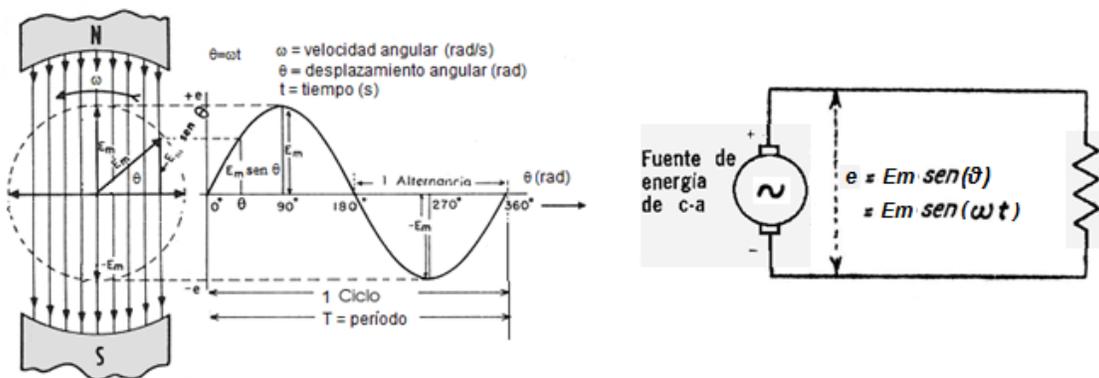


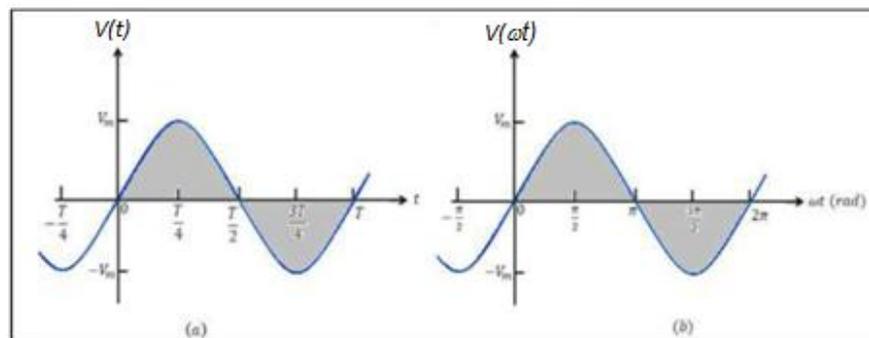
Figura 4.26 Características de la corriente alterna sinusoidal.

Del análisis de la figura, la fem producida se puede expresar como

$$e = E_m \text{sen}(\theta) = E_m \text{sen}(\omega t)$$

El valor del ángulo  $\theta$  es función de  $\omega$  y  $t$ , es decir  $e = f(\omega, t)$ .

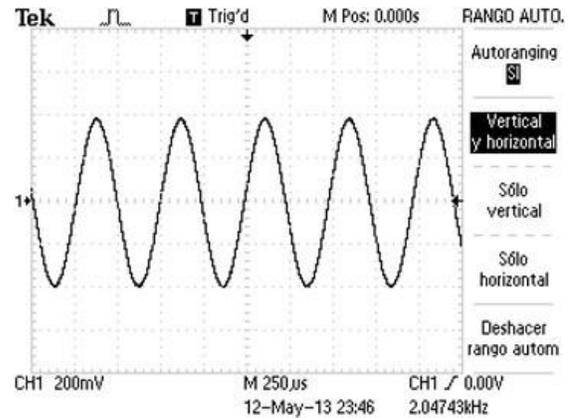
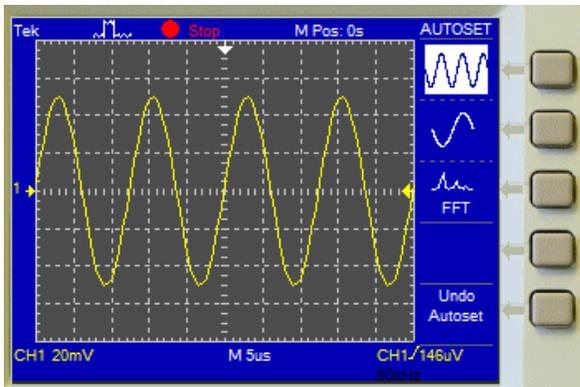
Por lo tanto, la fuerza electromotriz ( $fem$ ) depende de dos parámetros o dimensiones: Uno es el tiempo  $t$ , y el otro es la velocidad angular (o frecuencia angular)  $\omega$ .



Función senooidal. (a) En función de  $t$  y (b) en función de  $\omega t$

#### 4.2.2 Visualización de señales en el dominio del tiempo.

Hasta ahora las mediciones que se han realizado con el multímetro o con el osciloscopio, las cuales se han enfocado indicarnos la dependencia del voltaje (o la corriente) con respecto al tiempo únicamente.



Se define la frecuencia como el número de eventos recurrentes que tienen lugar en un intervalo unitario de tiempo. Cuando se refiere uno a señales eléctricas, la frecuencia ( $f$ ) es por lo general el número de ciclos de una onda periódica que se presentan por segundo. La duración del tiempo (en segundos) de un ciclo completo de esa onda se llama el periodo ( $T$ ) de la onda. La frecuencia y el periodo de una onda periódica se relacionan mediante

$$f = \frac{1}{T} \quad (8.1)$$

La unidad de frecuencia es el hertz (Hz, que antes se llamaba ciclos por segundo). La ecuación (8-1) indica que si se puede medir el tiempo o la frecuencia, se puede determinar la otra de estas cantidades.

Si  $\omega t = \theta$ , entonces en un tiempo  $T$ , hay un ciclo (o una vuelta completa del rotor),  $\theta = 2\pi$  rad, por lo tanto

$$\begin{aligned} \omega T &= 2\pi, & \text{o} \\ \omega &= 2\pi f \end{aligned} \quad (8.2)$$

Entonces, ya hemos establecido un método para determinar la frecuencia angular de una señal alterna senoidal: En el osciloscopio medimos el valor del periodo, y por ello determinamos el valor de  $f$ , y consecuentemente, el de  $\omega$ .

##### 4.2.2.1 Defasamiento $\phi$ de una señal eléctrica con respecto a otra.

Si sumamos un valor angular ( $0 < \phi < 2\pi$ ) al argumento de la función (dentro del paréntesis), veremos que se desplaza la señal, que ya no comenzará en cero. Esa diferencia angular se le llama desfase de una señal con respecto a otra.

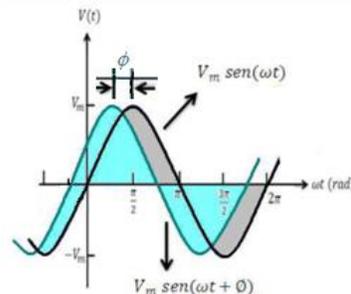


Figura 4.29 Adelanto o retraso de ondas senoidales

#### 4.2.3 Análisis armónico. Ondas complejas.<sup>5</sup>

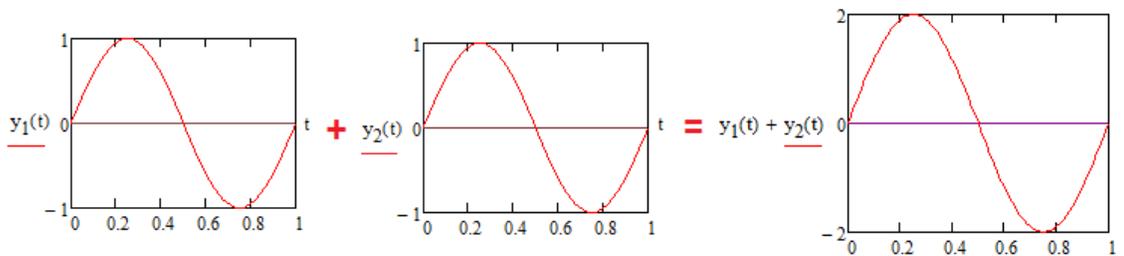
Primero vamos a considerar que si se superponen ondas tengan *diferentes frecuencias*, la onda resultante es *compleja*. En algunos casos ya no es una onda armónica simple y la forma no es una curva sinusoidal.

##### Igual frecuencia y amplitud.

a) Comenzamos suponiendo el caso más sencillo posible: dos ondas con la misma frecuencia y la misma amplitud, diferenciándose exclusivamente en un pequeño desfase.

$$y_1 = y_m \text{sen}(\omega t) \quad (2-22)$$

$$y_2 = y_m \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (2-23)$$

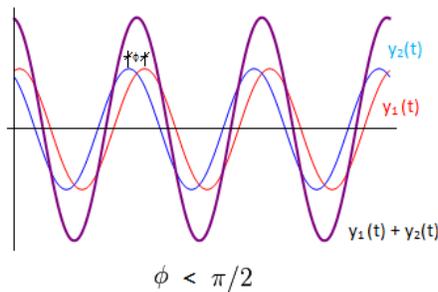


b) Dos ondas con la misma frecuencia y la misma amplitud, diferenciándose exclusivamente en un pequeño desfase.

Podremos escribir estas dos señales como

$$y_1 = y_m \text{sen}(\omega t) \quad (2-22)$$

$$y_2 = y_m \text{sen}(\omega t + 0.1\pi) \quad (2-23)$$



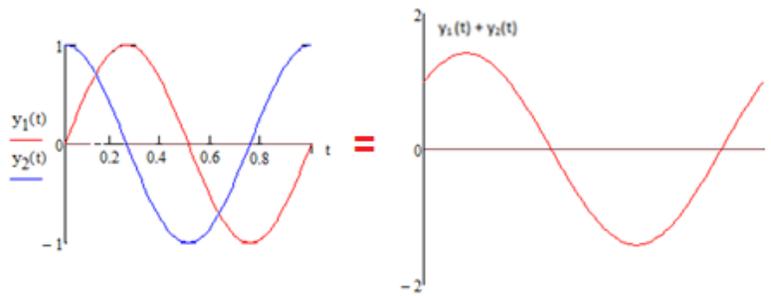
donde hemos tomado la primera señal como referencia y con desfase de ángulo  $\phi = 0.1\pi$ .

c) Con desfase de ángulo  $\phi = \pi/2$

$$y_1 = y_m \cos(\omega t) \quad (2-24)$$

$$y_2 = y_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2-25)$$

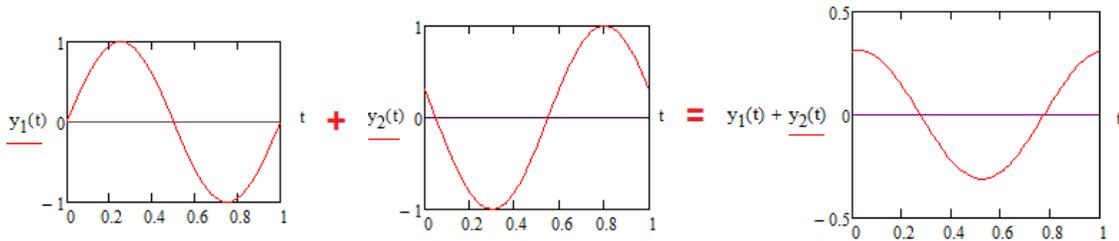
<sup>5</sup> [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Superposici%C3%B3n\\_de\\_ondas#Misma\\_frecuencia](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Superposici%C3%B3n_de_ondas#Misma_frecuencia)



d) Con desfase de ángulo  $\phi \approx \pi$

$$y_1 = y_m \cos(\omega t) \quad (2-24)$$

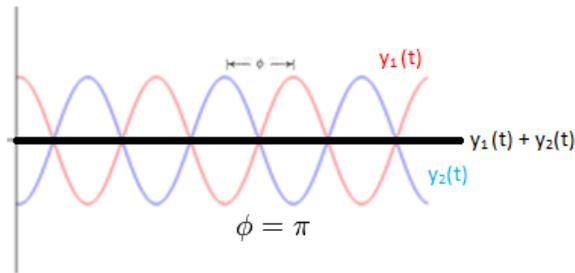
$$y_2 = y_m \cos(\omega t + 0.9\pi) \quad (2-25)$$



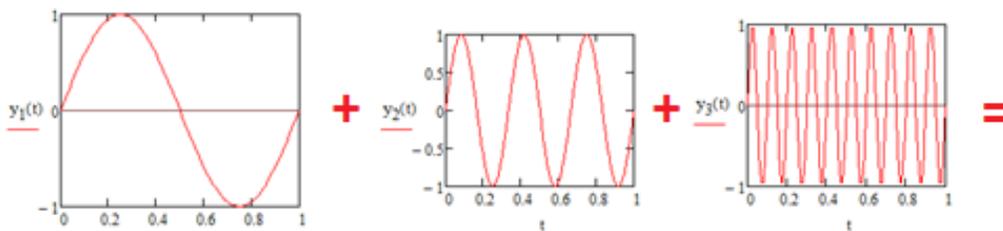
e) Con desfase de ángulo  $\phi = \pi$

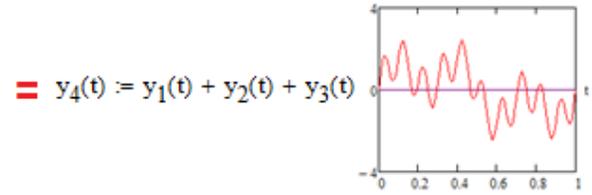
$$y_1 = y_m \cos(\omega t) \quad (2-24)$$

$$y_2 = y_m \cos(\omega t + \pi) \quad (2-25)$$

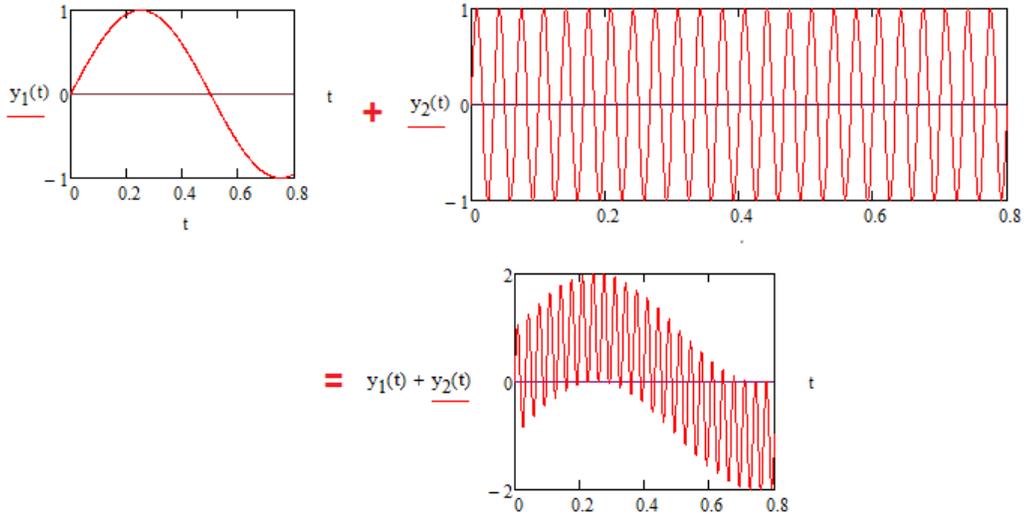


II.- La suma de tres ondas de frecuencias diferentes produce una onda de forma compleja.

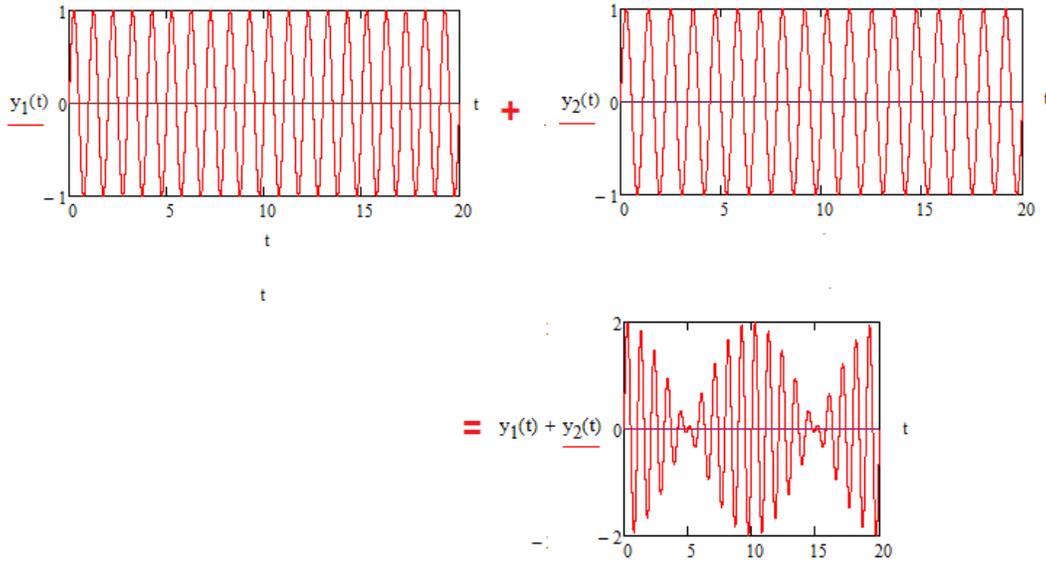




III.- La suma de dos ondas cuyas frecuencias difieren mucho.



La suma de dos ondas cuyas frecuencias son casi iguales, ilustra el fenómeno denominado de los batimientos.



#### 4.2.4 Algunos conceptos básicos en sistemas de comunicación.

Un sistema de comunicaciones se puede representar por el siguiente modelo



#### Señal de Banda Base y Señal de RF.

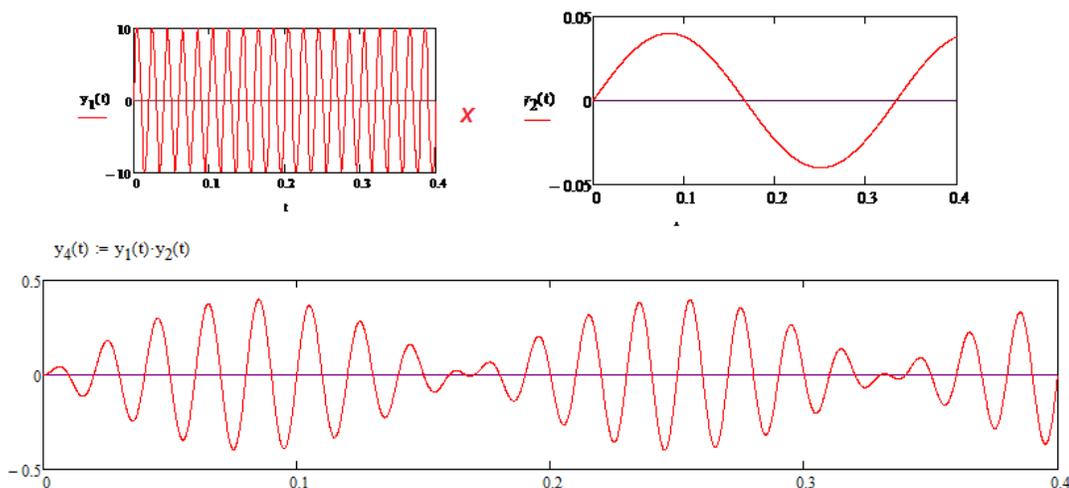
- El término BANDA BASE se refiere a la banda de frecuencias producida por un transductor, tal como un micrófono, salidas de video u otro dispositivo generador de señales. Se caracterizan por ser generalmente de frecuencias bajas y éstas se utilizan para modular una portadora.
- La señal de RADIOFRECUENCIA es una señal periódica cuya frecuencia es de un valor tal que facilita su propagación por un medio físico. Normalmente es una señal sinusoidal. En muchos casos la señal se designa como RF (Radio Frequency, RF). En el proceso de modulación es la señal encargada de portar la información, de allí su nombre PORTADORA.

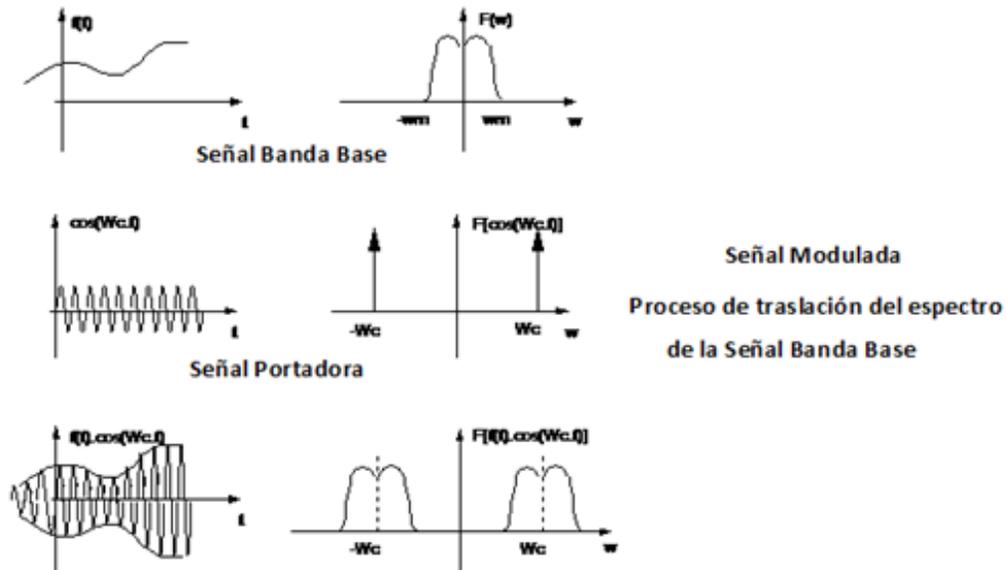
#### Concepto de Modulación.

- En telecomunicación el término modulación engloba el conjunto de técnicas para transportar información sobre una onda portadora, típicamente una onda senoidal.
- Proceso mediante el cual se utiliza la señal de banda base para modificar algún parámetro de una señal portadora de mayor frecuencia.

Modificación de alguno de los parámetros que definen una onda portadora (amplitud, frecuencia, fase), por una señal moduladora que se quiere transmitir (voz, música, datos).

El producto de dos ondas, una de ellas, cuya frecuencia es radiofrecuencia (RF) y la otra, es de frecuencia de audio (AF), ilustra el fenómeno denominado modulación de AM.





- **Ancho de Banda** De un equipo de Comunicaciones: Es la gama de frecuencias en las que puede trabajar ese equipo sin distorsionar la señal a su salida. Se representa por la letra **B** y se determina por la ecuación:

$$B = f_{Máxima} - f_{Mínima}$$

**Medir la calidad de la modulación** permite saber si el sistema trabaja apropiadamente y que la información será transmitida correctamente. Conocer el contenido espectral es importante, especialmente en comunicaciones donde se cuenta con un ancho de banda limitado. Testear el porcentaje de modulación, la amplitud de la banda lateral, la calidad de la modulación, ancho de banda ocupado, son algunas de las mediciones más comunes en modulación.

En comunicaciones, **medir la distorsión** tanto en los receptores, como en los transmisores es crítico. Por ejemplo, una distorsión excesiva de armónicas en la salida del transmisor puede interferir con otras bandas de comunicación. Las mediciones comunes de la distorsión, incluyen la intermodulación, armónicas, y las emisiones espurias.

Cualquier dispositivo o circuito activo puede generar ruido. Medir este **ruido** y la relación Señal / Ruido es importante para caracterizar el comportamiento de los dispositivos y su contribución al ruido general del sistema.

#### 4.2.5 El espectro de ondas electromagnéticas.

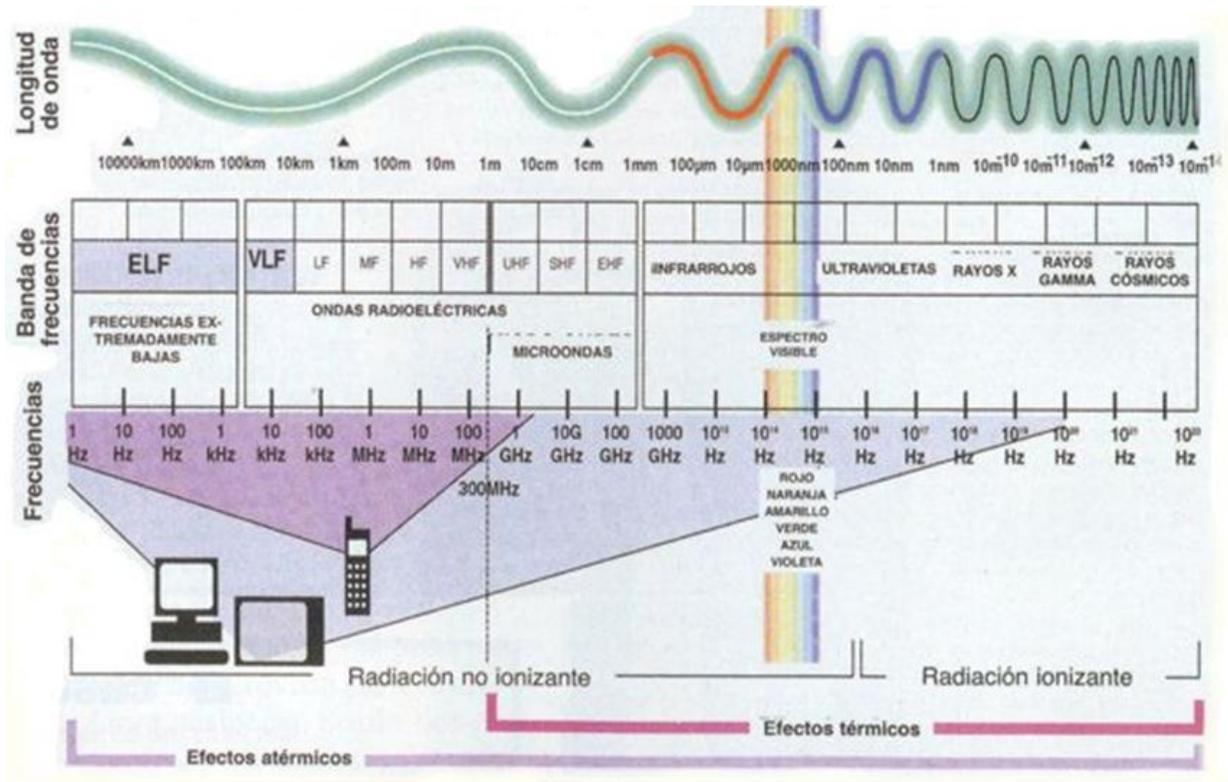


Figura 4.44 Espectro electromagnético.

#### 4.2.2 Visualización de señales en el dominio de la frecuencia.

En términos muy amplios el concepto de análisis de frecuencia (o, análisis de señales en el dominio de la frecuencia) es el proceso de dividir una señal eléctrica compleja en sus componentes frecuenciales, sus niveles de potencia, etc. y sus resultados son presentados en una gráfica llamada espectrograma o simplemente espectro. Para este fin se necesitan instrumentos de medida que se denominan analizadores de espectro, tanto analógicos como digitales.

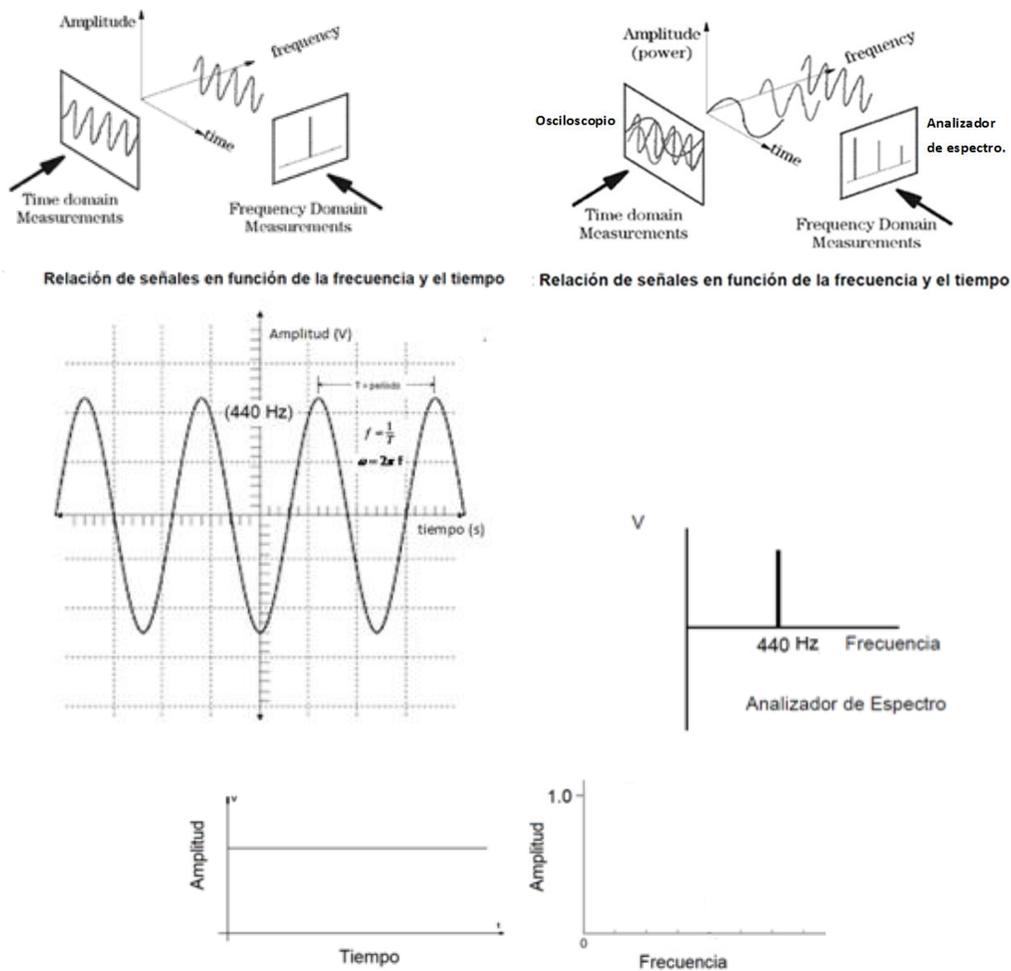


Figura 4.47 Gráficas en el dominio del tiempo y de la frecuencia para una c.d.:

##### 4.2.2.1 Introducción al analizador de espectro

Las señales eléctricas ofrecen y transmiten diferentes tipos de información, que se podrá adquirir o entender dependiendo del análisis que se les haga. Es así, que en el dominio del tiempo se puede obtener información de una señal eléctrica tal como su amplitud, período (frecuencia) y fase, siendo éstas las principales características de la misma.

El análisis de señales en el dominio de la frecuencia permite descubrir aspectos de la señal que serían muy difíciles o imposibles de observar a partir de su representación temporal. Por ejemplo la Figura 4.48 (a) muestra un tono que parece ser sinusoidal puro. Sin embargo, el espectro de esta señal, que se observa en la Figura 4.48 (b), revela la presencia de otras componentes frecuenciales. Cuando se grafican estas componentes en el dominio frecuencial son detectadas porque no quedan enmascaradas por las señales de gran amplitud.

Esto no significa que las mediciones en el dominio de la frecuencia sean “mejores” que las mediciones en el dominio tiempo. Cierta clase de medidas, como el tiempo de elevación y de caída de un pulso, el sobrepico, y las oscilaciones amortiguadas pueden medirse en el dominio temporal (por ejemplo, con un osciloscopio).

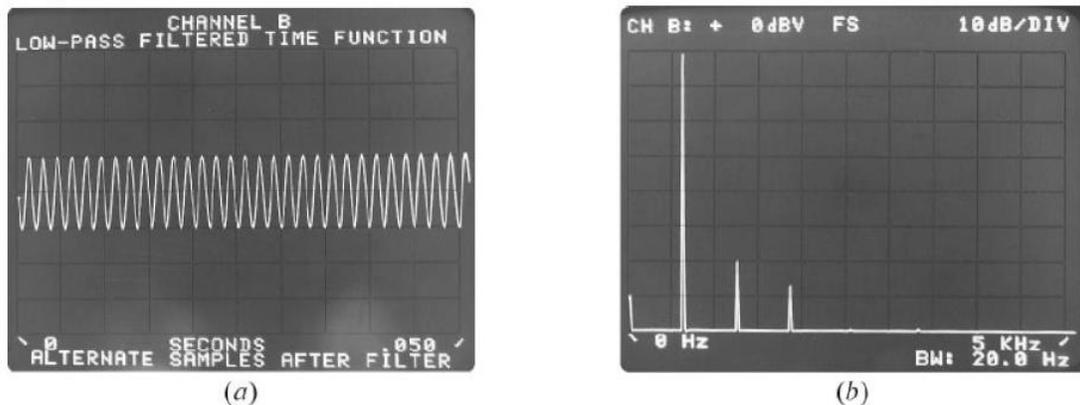


Figura 4.48 a) Muestra tomada de un osciloscopio b) Misma muestra tomada de un analizador de espectros

En otras aplicaciones, en cambio, las mediciones en el dominio frecuencial son más ventajosas, como por ejemplo la determinación del contenido armónico. En el campo de las comunicaciones es muy importante la medición de la distorsión armónica; tal es el caso de los sistemas celulares, donde debe verificarse el contenido armónico de la señal portadora para evitar interferencias con otros sistemas que operan en las mismas frecuencias que los armónicos.

Mientras que el comportamiento de una señal en el dominio tiempo puede analizarse con un osciloscopio, el análisis en el dominio transformado requiere de un instrumento que tradicionalmente era bastante más costoso y más complicado de utilizar: el analizador de espectro. Hoy en día es frecuente que los osciloscopios digitales sean capaces de mostrar el espectro de una señal, utilizando ciertas herramientas adicionales que posteriormente se tratarán. Tales instrumentos reciben el nombre de analizadores digitales de espectro. A continuación se detallan los tipos más comunes que se pueden encontrar.

#### 4.2.2.2 El analizador de espectro y los diferentes tipos disponibles

Un analizador de espectro es un equipo de medición electrónica que permite visualizar en una pantalla las componentes espectrales de una determinada señal presente en la entrada, pudiendo ser ésta cualquier tipo de onda eléctrica, acústica u óptica.

El eje de ordenadas (las Y), suele presentarse en una escala logarítmica en dB el nivel del contenido espectral de la señal. En el eje de abscisas se representa la frecuencia, en una escala que es función de la separación temporal y del número de muestras capturadas. Se denomina frecuencia central del analizador a la que corresponde con la frecuencia en el punto medio de la pantalla.

Una de las maneras en que el *analizador de espectro* (figura 4.49) lleva a cabo este análisis es empleando un filtro que rechaza todas las frecuencias, excepto una banda muy estrecha de ellas. La frecuencia central de la banda angosta del filtro se recorre a lo largo del rango de interés con el analizador de espectros. Los componentes de frecuencia de la señal que se analiza pasan hacia la pantalla sólo cuando su frecuencia coincide con la del filtro de barrido. Se emplea un tubo de rayos catódicos o una pantalla de LCD como dispositivo para mostrar la amplitud de cada armónica de la señal, contra la frecuencia en el rango de la frecuencia barrida (figura 4.50 b)]. Los analizadores de espectro se fabrican para mostrar señales en los rangos desde 5 Hz hasta 40 GHz.

En la figura 4.50 a) y b) se muestra una señal tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia. En el dominio del tiempo todos los componentes de distintas frecuencias de la señal son sumados y mostrados juntos. En el dominio de la frecuencia la señal es separada en sus componentes de frecuencias y se muestra el nivel de cada una.

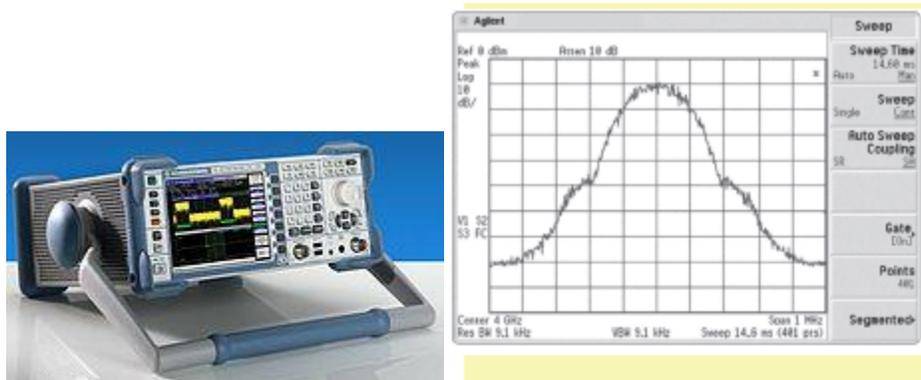


Figura 4.49. Analizador de espectro Rohde & Schwarz FSL y el espectro de una señal GSM<sup>6</sup>

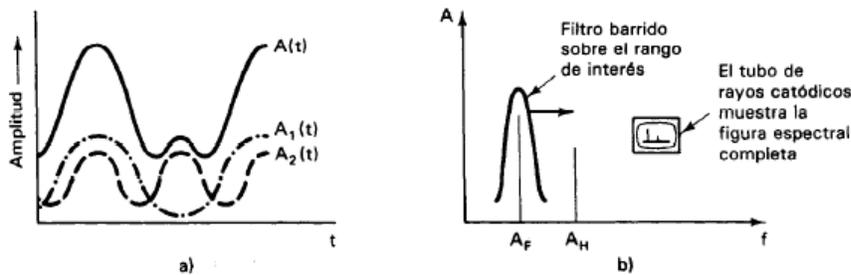


Figura 4.50 a) y b)

Atendiendo a su naturaleza, los analizadores de espectro se pueden clasificar en dos tipos: analógicos y digitales:

- **Los analizadores espectrales analógicos** se dividen en dos clases. La primera clase tiene varias salidas, y en un tiempo  $t = t_0$  cada una de ellas mide una componente frecuencial distinta de la señal de entrada; de modo que el espectro deseado se lee simultáneamente. Se distinguen según su construcción:
  - Analizador de filtros en paralelo. Se trata de un analizador en tiempo real formado por un banco de filtros paso banda contiguos y un banco de detectores, donde cada conjunto analiza una porción del espectro.

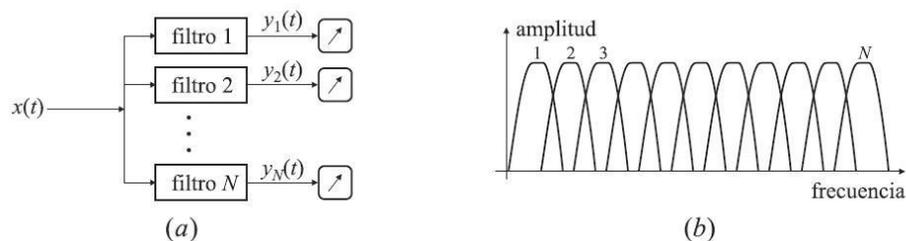


Figura 4.51 Analizador analógico de espectro simultáneo

<sup>6</sup> Las siglas GSM se derivan del término inglés **Global System for Mobile communications**.

La segunda clase consta de una única salida que mide las distintas componentes frecuenciales en instantes de tiempos consecutivos. Se dice que el espectro se determina secuencialmente. Destacan:

- Analizador secuencial. Aprovecha el mismo principio que el primero, pero emplea un conmutador para reducir el número de detectores necesarios.

Analizador de barrido con filtro sintonizable. En este sistema (Figura 4.52) el analizador dispone de un filtro (de ancho de banda  $B$ ) que se sintoniza linealmente a lo largo de un margen frecuencial ( $f_1$ - $f_3$ ) durante un intervalo de tiempo  $T$ , manteniendo durante este intervalo su ancho de banda constante.

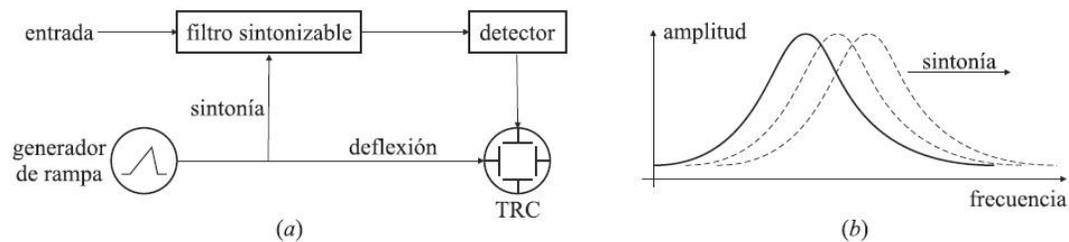


Figura 4.52 Analizador analógico de espectro de barrido

#### 4.2.2.3 Analizadores espectrales híbridos.

Algunos otros analizadores como los de *Tektronix* utilizan un híbrido entre análogo y digital al que llaman analizador de espectro en "tiempo real".

- Analizador analógico. Utilizan un filtro pasa banda de frecuencia variable cuya frecuencia central se afina automáticamente dentro de una gama de fija. También se puede emplear un banco de filtros o un receptor superheterodino donde el oscilador local barre una gama de frecuencias. Algunos otros analizadores como los Tektronix (de la serie RSA) utilizan un híbrido entre análogo y digital al que llaman analizador de Espectros "en tiempo real". Las señales son convertidas a una frecuencia más baja para ser trabajadas con técnicas FFT (*Fast Fourier Transform* o transformada rápida de Fourier).

- Analizador digital de espectro. Utiliza la (FFT), un proceso matemático que transforma una señal en sus componentes espectrales. Algunas medidas requieren que se preserve la información completa de señal frecuencia y fase, este tipo de análisis se llama vectorial.

Los analizadores de espectros que utilizan transformada de Fourier realizan un tratamiento digital de la señal de entrada durante un determinado periodo de tiempo. De esta transformación se obtiene como resultado una información de frecuencia, fase y amplitud. El tratamiento digital de la señal nos permite el análisis de señales tanto de tipo periódicas o aleatorias. Por el contrario, al igual que los analizadores en tiempo real, presentan inconveniente del pequeño ancho de banda con que trabajan, limitado por la propia digitalización que sufre la señal. El margen de frecuencias hasta donde suelen llegar a trabajar este tipo de analizadores de espectros es de unos pocos cientos de kilohertz (KHz).

##### 4.2.2.3.1 Analizador de barrido superheterodino

Aún cuando para un determinado ancho de banda de análisis el analizador espectral de barrido es más económico que el analizador de banco de filtros, también es extremadamente costoso debido a que es difícil diseñar un filtro pasabanda selectivo, de alta calidad cuya frecuencia central pueda ajustarse a voluntad sobre un amplio rango de frecuencias manteniendo un "Q" constante. Sin embargo, este inconveniente puede solucionarse en base a la propiedad de modulación de la transformada de Fourier.

Si en lugar de sintonizar la frecuencia central del filtro como en el caso del analizador de barrido con filtro sintonizable, lo que se hace es desplazar el espectro de la señal de entrada, el resultado que se conseguiría sería el mismo. Basándose en esta idea, el analizador superheterodino realiza una doble conversión a frecuencia intermedia (FI), permitiendo utilizar un único filtro, de manera que éste mantiene sus características a lo largo de toda la banda de frecuencias. No obstante permite disponer de diferentes filtros seleccionables en la etapa de FI para poder trabajar con diferentes resoluciones, según el tipo de medida que se desee realizar.

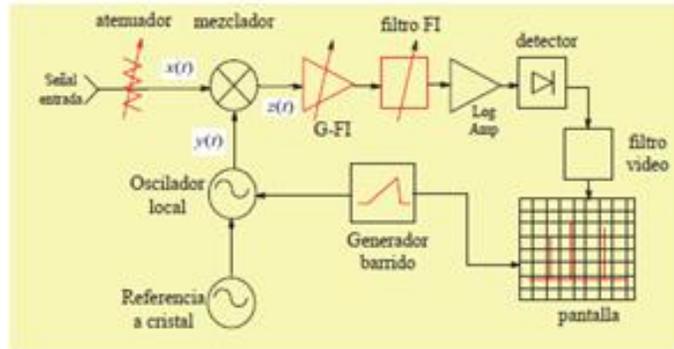


Figura 4.53 Analizador de barrido superheterodino.

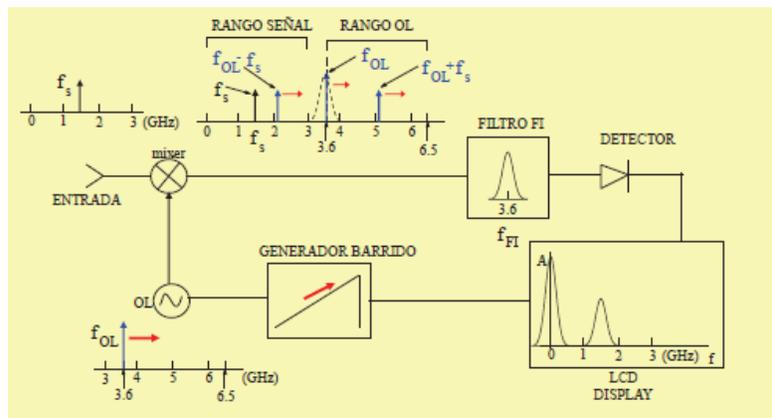


Figura 4.54 Proceso de medida.

Heterodinar” significa mezclar, y “super” se refiere a frecuencias superiores a las de la señal a analizar. El diagrama bloque indica que la señal de entrada después de atravesar un filtro pasabajos entra a un mezclador, donde se superpone con la señal proveniente de un oscilador local.

El mezclador es esencialmente un multiplicador, de modo que a la salida no sólo hay componentes correspondientes a la suma y la diferencia de las frecuencias de la señal de entrada y del oscilador local, sino también sus armónicas, que son removidas por el filtro de frecuencia intermedia. Las señales útiles entran a un detector de envolvente, encargado de medir la magnitud de la salida.

Por último, hacer un inciso para aclarar que estos equipos son sensibles a la señal de entrada y dan unas medidas muy precisas dentro de las especificaciones para las cuales fueron construidas. Sin embargo, la sensibilidad de la medida hace que los resultados pueden estar deteriorados respecto a la señal que se requiere analizar por distorsión o mal empleo al medir la señal de entrada. En algunos casos se debe tomar ciertas medidas de protección antes de analizar señales desconocidas.

#### 4.2.2.4 El analizador de espectro (Spectrum Analyzer) en el Software Multisim.

El Analizador de Espectro se utiliza para medir la amplitud de la señal con respecto a la frecuencia. Este instrumento es capaz de medir potencia y los componentes de la frecuencia de una señal, y ayuda a determinar la existencia de armónicos en la señal.

Un área que tiene interés en la medición del espectro son las comunicaciones. Por ejemplo, los sistemas de radiocomunicaciones celulares deben ser chequeados para detectar armónicos de la señal portadora que puedan interferir con otros sistemas de RF. Otras aplicaciones interesantes del análisis del espectro son las distorsiones del mensaje modulado sobre una portadora.

El Analizador de Espectro muestra sus mediciones en el dominio de la frecuencia en lugar del dominio del tiempo. Por lo general, el marco de referencia en el análisis de la señal es el tiempo. En ese caso, se utiliza un osciloscopio para mostrar el valor instantáneo en función del tiempo. A veces se espera una forma de onda senoidal, pero la señal, en lugar de ser pura sinusoidal, tiene un armónico en ella. Si la misma señal fuera desplegada en un Analizador de Espectro, se mostraría su amplitud, pero también sus componentes de frecuencia, es decir, su frecuencia fundamental y los armónicos que pueda contener.

Un analizador de espectro real caracteriza a los siguientes parámetros:

- Rango de frecuencia en el que funciona el instrumento.
- Intervalos de frecuencia.
- Nivel de referencia.
- Rango de medición.

Todos ellos están representados en el Analizador de Espectro Multisim y deben configurarse manualmente.

##### Rango de frecuencia

El rango de frecuencias es el rango sobre el cual el Analizador de Espectro analizará las señales. Hay dos frecuencias que se establecen manualmente: f-start (valor mínimo 1kHz) es introducido en el campo *Inicio (Start)* y se introduce f-end (valor máximo de 4 GHz) en el campo Fin (**End**).

La frecuencia cero no está permitida para ninguno de los ajustes de frecuencia.

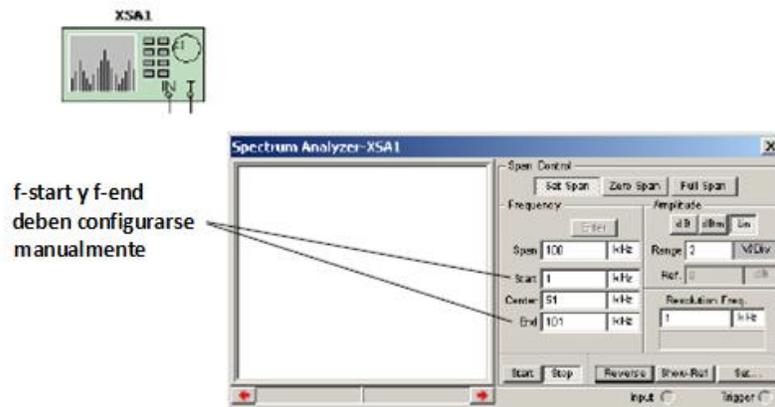
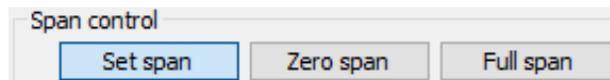


Figura 4.55 Configuración de rangos de frecuencia.

## Rangos (Spans) de frecuencia

Este parámetro indica los rangos de frecuencia que se pueden visualizar:



- Full Span - Se muestra el rango total del instrumento, de 1 kHz a 4 GHz.
- Zero Span - Se visualiza una sola frecuencia definida por el campo *Center*.
- Set Span - El rango de frecuencia se determina utilizando el control de span o el control de frecuencia, como se explica en "Análisis de frecuencias" a continuación.

## Análisis de frecuencias

Hay dos métodos para seleccionar el rango de frecuencia:

- Control de span
- Control de frecuencia.

### Control de Span

Esta técnica establece el span (rango) y las frecuencias centrales, es decir, *f-span* y *f-center*.

- Para configurar el span y las frecuencias centrales, haga clic en *Enter* (en el área *Frecuencia* del despliegue del instrumento) para calcular automáticamente los valores de *f-start* y *f-end* usando las siguientes expresiones:

$$f\text{-start} = (f\text{-center} - f\text{-span} / 2)$$

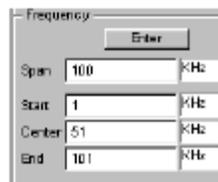
$$f\text{-end} = (f\text{-center} + f\text{-span}/2)$$

### Control de Frecuencia

Se puede definir las frecuencias de inicio y finalización manualmente. Para hacer esto, se necesita introducir los valores numéricos de las frecuencias en el área *Frecuencia* del cuadro de diálogo. Sus valores deben ser valores distintos de cero. Cuando se hace clic en *Enter*, la frecuencia central (*f-center*) y el intervalo de frecuencia que se muestra en el Analizador de espectro (*f-span*) son calculados automáticamente. La relación entre estos parámetros se expresa de la siguiente manera:

$$f\text{-center} = (f\text{-start} + f\text{-end})/2$$

$$f\text{-span} = (f\text{-end} - f\text{-start})$$



Estas dos técnicas están interrelacionadas, es decir, no es posible establecer los cuatro parámetros independientemente. Ambas técnicas son útiles. Por ejemplo, si desea ver componentes de frecuencia alrededor de una frecuencia específica tal como 100 MHz +/- 100 kHz, entonces la técnica de control de frecuencia es más fácil de aplicar. La frecuencia central, en este ejemplo, es de 100 MHz, y el intervalo es  $2 \times (100 \text{ kHz}) = 200 \text{ kHz}$ .

### Rango de amplitud.



Se puede configurar el rango de amplitud de la señal visible en la pantalla seleccionando una de las siguientes tres opciones:

- **dB** - Significa  $20 \cdot \log_{10}(V)$ , donde  $\log_{10}$  es el logaritmo en la base 10, y V es la amplitud de la señal. Cuando se utiliza esta opción, la señal se visualiza en "dB por división", que se muestra en el lado derecho del analizador de espectro. La lectura en dB es de interés cuando se mide la potencia de la señal.
- **dBm** - Se representa por  $10 \cdot \log_{10}(V / 0.775)$ . Cero dBm es la potencia disipada en una resistencia de 600 ohm cuando el voltaje a través de ella es 0.775 V. Esta potencia es igual a 1 mW. Si el nivel de una señal es +10 dBm, significa que su potencia es de 10 mW. Cuando se utiliza esta opción, la potencia de la señal se muestra en función de la referencia de 0 dBm. Para aplicaciones en las que la resistencia de salida es de 600 Ohm, como en las líneas telefónicas, es más conveniente para leer en DBm, ya que es directamente proporcional a la disipación de potencia. Sin embargo, en dB, es necesario incluir el valor de la resistencia para encontrar la potencia disipada en la resistencia. En dBm, el valor de la resistencia ya se ha tomado en cuenta.
- **Lin** - Selecciona una visualización lineal de la señal. Para cambiar la amplitud máxima visualizada en la pantalla, ingrese un valor de voltaje en el campo *Rango*.

### Nivel de referencia.

El nivel de referencia se utiliza para ajustar el rango de la señal de entrada que puede ser mostrada en la pantalla.

Los ejes del *Analizador de Espectro* no están marcados por unidades y valores. Se puede leer la frecuencia y la amplitud de cada punto mostrado en la pantalla usando el cursor. También se puede hacer clic con el botón derecho en el cursor para mostrar un menú emergente que permite mover el cursor a punto preciso en el gráfico. Cuando el cursor se mueve y coloca en el punto de interés, la frecuencia y la amplitud en V, dB o dBm se muestran debajo de la gráfica.

Se puede observar más de una frecuencia y evaluar los resultados de todo el rango de frecuencia mostrado. Es posible que desee saber cuándo la amplitud (en dB o dBm) de algunos componentes está por encima de un cierto límite en dB o dBm. Por ejemplo, asuma que está interesado en la amplitud (-3dB). Al situar (-3dB) puntos puede estimar el ancho de banda del amplificador. Al hacer clic en Show-Ref, puede establecer el nivel de referencia en (-3dB) y, usando el cursor al mismo tiempo, puede encontrar el borde inferior y el borde superior de la banda de paso.

También puede averiguar si la amplitud de la señal es menor que un cierto valor para un cierta banda de frecuencia. Para ello, observe las señales en el Analizador de Espectro y utilice el botón de referencia. El valor de referencia máximo en dB se ajusta en (+30 dB). Show-Ref está disponible sólo si dB o dBm están activados.

### Resolución de frecuencia

La resolución de frecuencia se ajusta inicialmente a un valor mínimo de  $\Delta f = f\text{-end} / 1024$ . Sin embargo, puede cambiarlo a un valor mayor y observar el espectro. Debe seleccionar la resolución de frecuencia de modo que las frecuencias sean múltiplos enteros de las resoluciones de frecuencia.

Nota: Para una lectura precisa, los componentes de frecuencia no deben estar por debajo de  $\Delta f$ .

#### 4.2.2.4.1 Ejemplos de aplicación del programa MULTISIM.

##### Ejemplo 1

La siguiente figura muestra un mezclador, que se utiliza a menudo en aplicaciones de comunicaciones.

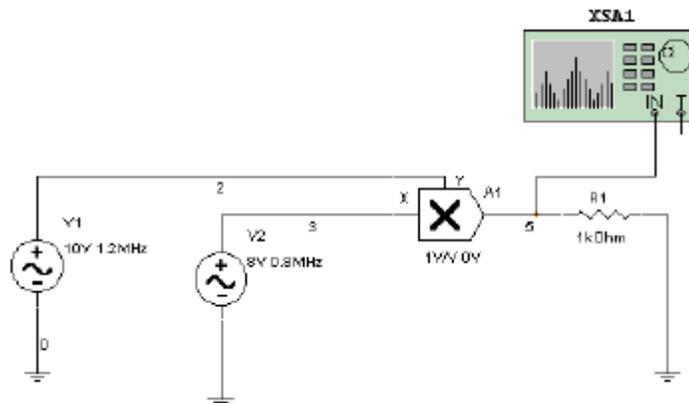


Figura 4.58. Analisis de un circuito mezclador

Hay dos formas de onda sinusoidales de entrada. Sus frecuencias son 0.8 MHz y 1.2 MHz. Las amplitudes se ajustan a 8 V y 10 V, respectivamente. Obsérvese que la amplitud es el valor máximo de la forma de onda sinusoidal (no es el valor RMS de la forma de onda). El mezclador está ajustado a multiplicar las señales con ganancia unitaria sin introducir un desplazamiento en ninguna de las señales de entrada. Se puede esperar encontrar dos componentes en la salida colocada en  $(1.2 + 0.8) = 2$  MHz, y  $(1.2 - 0.8) = 0,4$  MHz.

➤ Si desea probar este ejemplo por sí mismo, haga lo siguiente:

1. Construya la red como se muestra arriba.
2. Haga doble clic en el multiplicador y ajuste las ganancias a 1 y los desplazamientos a cero.
3. Haga doble clic en el Analizador de Espectro e inicialícelo usando una frecuencia de inicio y final. (El ejemplo 3 de este capítulo muestra otra forma de inicializar el Analizador de Espectro).
  - Ponga Span a 3MHz y Center a 1.8 MHz.
  - Haga clic en *Enter*. El valor de frecuencia de *f-start* se ajusta automáticamente a  $(1.8 \text{ MHz} - 3/2 \text{ MHz}) = 300 \text{ kHz}$ . El valor de frecuencia de *f-end* se ajusta automáticamente a  $(1.8 \text{ MHz} + 3/2 \text{ MHz}) = 3,3 \text{ MHz}$ .
  - Dado que la amplitud del componente está alrededor de  $(8 * 10) / 2 = 40 \text{ V}$ , ajuste el rango de amplitud a 100 V en el modo "LIN".
4. Ejecute el simulador.
5. Haga doble clic en el Analizador de Espectro.
6. Haga clic en Inicio y espere hasta que la señal se estabilice. El Analizador de Espectro comienza a realizar la Transformada de Fourier de la señal de entrada en el tiempo dominio. Sin embargo, puesto que comienza con sólo unas pocas muestras, no proporciona resultados precisos inicialmente. Debe esperar hasta que la pantalla se actualice varias veces para obtener lecturas de los componentes de frecuencia y sus magnitudes. En este momento, la resolución de frecuencia interna es igual a la resolución de frecuencia definida por el usuario. Ambos valores se muestran en el dispositivo. Usando el cursor en la pantalla, puede leer la amplitud y la frecuencia de cada componente. En el ejemplo, las lecturas son iguales a los valores calculados, es decir, dos componentes de frecuencia a 2 MHz y 0.4 MHz, con una magnitud de 40 V.

## Ejemplo 2

Para ejecutar otro ejemplo, debe detener la ejecución de la simulación ejemplo anterior. El segundo ejemplo tiene la misma estructura de circuito, como se muestra a continuación.

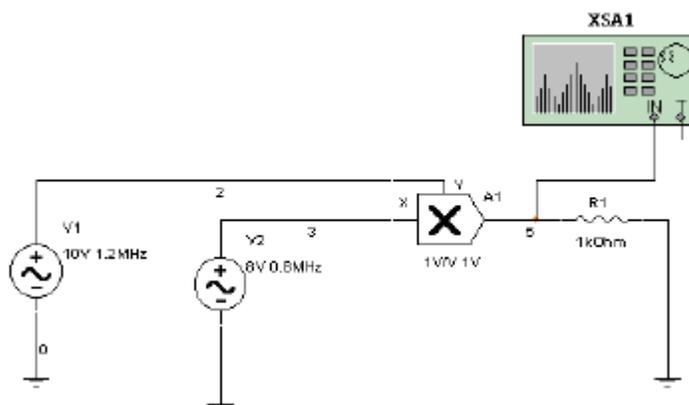


Figura 4.59 Circuito multiplicador

Sin embargo, se introducen los DC offsets (1 V) para las señales de entrada y de salida. Debido a los offsets, tendrá componentes en DC, así como 0.8 MHz y 1.2 MHz. El analizador de espectro muestra los componentes y su amplitud en la pantalla si se utiliza también el mismo ajuste aquí que el usado en el ejemplo anterior.

## Ejemplo 3

Este ejemplo considera un dispositivo activo que funciona en saturación. Esta estructura se muestra abajo:

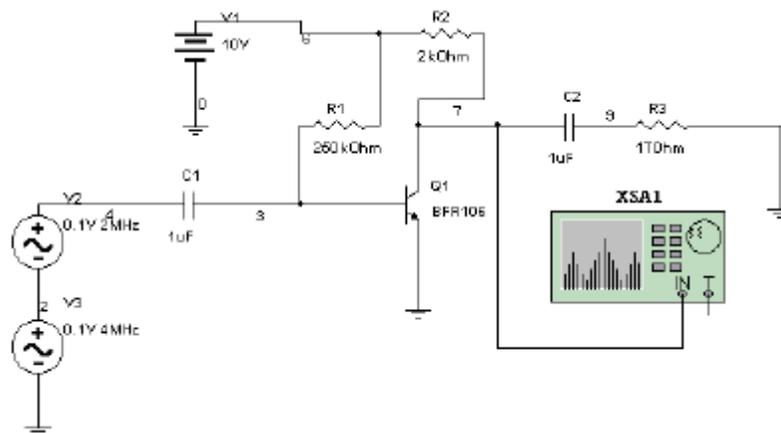


Figura 4.60 Análisis del funcionamiento de un amplificador

Iniciar el *Analizador de Espectro*:

1. Haga doble clic en el *Analizador de Espectro*.
2. Ajuste *Start* a 1 kHz y *End* a 11MHz.
3. Haga clic en *Enter*. El valor de frecuencia de f-span es  $(11 \text{ MHz} - 1 \text{ kHz}) = 10.999 \text{ kHz}$ . El valor de frecuencia de f-center es  $(11 \text{ MHz} + 1 \text{ kHz}) / 2 = 5.5005 \text{ MHz}$ .
4. Ajuste el rango a 2 dB / división, y ajuste la referencia a 4 dB para demostrar la aplicación de nivel de referencia dB.

Los valores de frecuencia de  $f$ -start y  $f$ -end se ajustan de manera que los componentes de frecuencia de interés son capturados y sus magnitudes pueden ser estudiadas. Con el Analizador de Espectro, puede verificar que hay más de dos componentes de frecuencia presentes en el nodo de salida. Son tres componentes por encima de 4 dB –frecuencia cero, 2 MHz y 4 MHz. Otros componentes de frecuencia están en frecuencias más altas y tienen un nivel de dB inferior a 4 dB.

#### Ejemplo 4. Análisis de la onda cuadrada con Multisim.

En este punto se maneja el “Analizador de Espectro” del Multisim para comprobar que una onda cuadrada se sintetiza con armónicas impares de diferentes amplitudes e igual fase que la fundamental.

1. Construir el siguiente esquema en Multisim. Corremos la simulación.

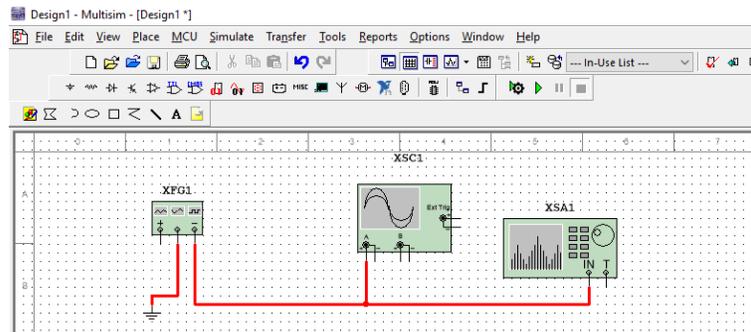


Figura 4.61 Esquema a analizar.

2. Seleccionamos *Graphier* de la barra de tareas *View*:

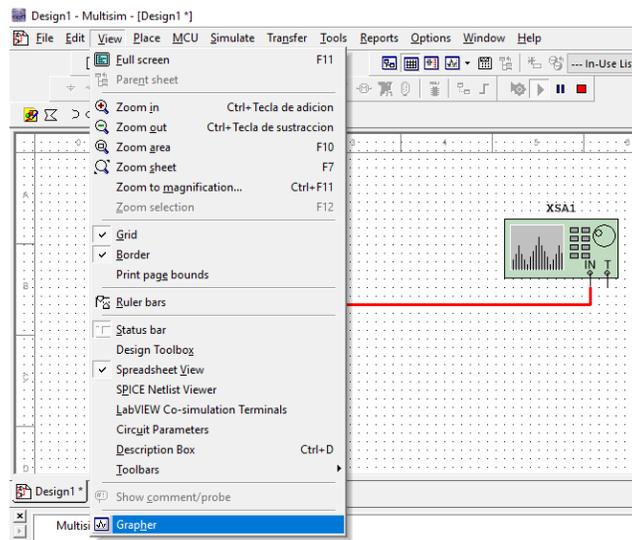


Figura 4.62 Se selecciona *Graphier*.

3. Aparece la gráfica espectral de la onda cuadrada.

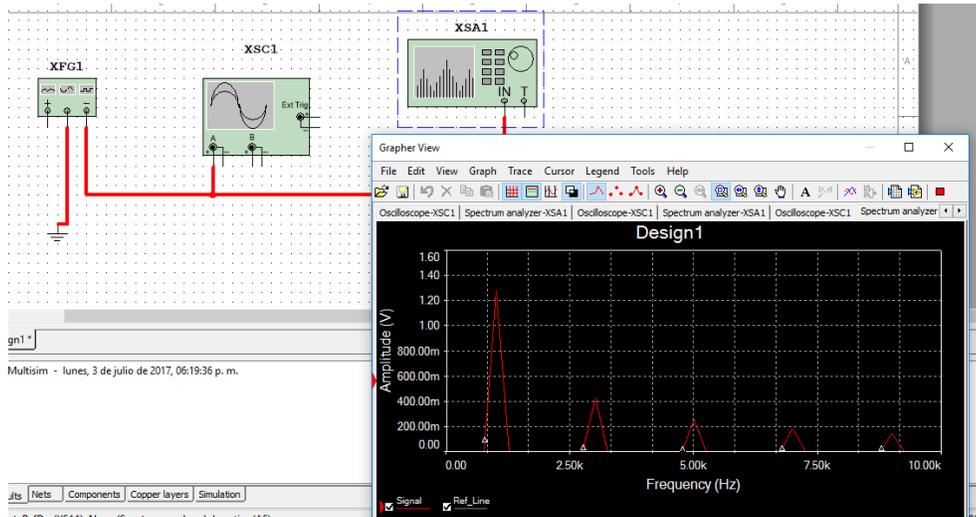


Figura 4.63 Análisis de una onda cuadrada con el analizador de espectro

El cursor del analizador de espectro nos permite descubrir que las componentes son todas señales armónicas impares del original.

### Ejemplo 5. Señales de RF moduladas

La señal más simple que podemos considerar es una señal portadora de 100 KHz modulada en amplitud por un tono de 10 KHz.

Es una señal muy difícil de dibujar porque en ella existen dos frecuencias, una de 10 KHz y otra de un valor 10 veces mayor. Si se ajusta el grafico o el osciloscopio a la señal de portadora no se puede apreciar más que unos pocos ciclos y si se ajusta a la señal de la modulación se ve la portadora muy comprimida. Y cuando mayor es la frecuencia portadora, más difícil y más lenta es su simulación. Por eso elegimos dos frecuencias relativamente cercanas.

El instrumento que analiza las señales en el dominio de la frecuencia se llama “Analizador de Espectro” y como su uso no es tan común como el osciloscopio, vamos a explicar su funcionamiento aplicándolo a la observación de la señal de 100 KHz modulada al 100% con una señal de 10 KHz y para comparar al lado la gráfica en un osciloscopio.

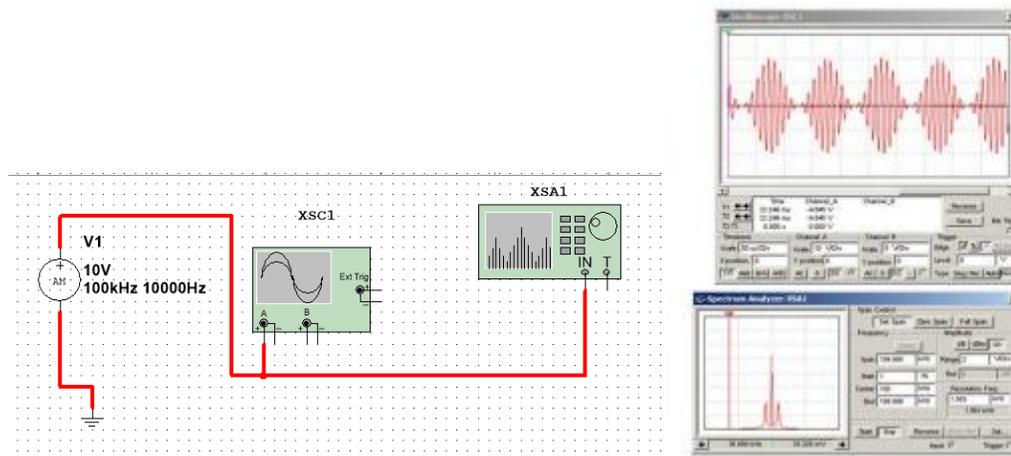


Figura 4.64 Señal de AM vista en el Analizador de Espectro

Primero debemos delimitar la banda de trabajo del analizador de espectro. En nuestro caso la portadora esta en 100 KHz por lo tanto seria interesante que dicha portadora apareciera en el centro del gráfico. Comenzamos entonces (con la simulación apagada) donde dice: Span Control en predisponer Set Span, que significa que vamos a trabajar eligiendo la banda de observación en forma manual. La parte inferior esta dividida en dos sectores indicados como frecuencia y amplitud ajustemos primero la banda de frecuencia a barrer.

1. Debemos elegir en la ventana center la frecuencia central deseada que en nuestro caso es de 100 KHz y luego los extremos de banda que para empezar ubicamos en 1 Hz y en 200 KHz.
2. Con estos datos sabemos que vamos a barrer una banda de 200 KHz y por lo tanto lo ponemos en la ventana Span.
3. Al ingresar los datos con enter (arriba de los mismos) es posible que el programa realice algún redondeo tal como puede observarse. (199.999 en lugar de 200.000).
4. Ahora debemos ajustar el sector amplitud a medir. Como nuestra portadora es de 10V elegimos un rango de 2 V/Div para que sea bien visible en la pantallita.
5. Luego se observa una ventanita indicada como Resolution Frec. que no permite obtener una definición mayor o menor de la gráfica. Yo la coloqué en 1500 Hz y el programa la modifiko a 1563 Hz.
6. Encienda la simulación y verá que aparece el gráfico indicado en la figura.
7. Con el cursor, explore el gráfico y lea las indicaciones de amplitud frecuencia debajo de la pantallita. Ud puede elegir que las indicaciones sea en dB en dBm o en una escala lineal que es la que elegimos nosotros.

El resultado es muy interesante. Aparece la frecuencia portadora con la amplitud real de 7V eficaces y dos frecuencias corridas 10 KHz hacia abajo y 10 KHz hacia arriba, con una amplitud de 3,5V es decir la mitad de la portadora. Esto significa que la energía se divide mitad para la portadora y mitad para las bandas laterales que en este caso no son bandas, sino simples frecuencias.

En la figura parece un espectro continuo pero eso se debe sólo al "seteo" de nuestro instrumento; realmente hay tres señales senoidales en 90 KHz, 100 KHz y 110KHz.

El alumno debe completar el trabajo observando diferentes señales de portadora y de modulación y analizando los gráficos del osciloscopio y el Analizador de Espectro. Nosotros solo vamos a analizar la misma señal, pero con un cambio en la resolución del instrumento que ponemos en 500 Hz.

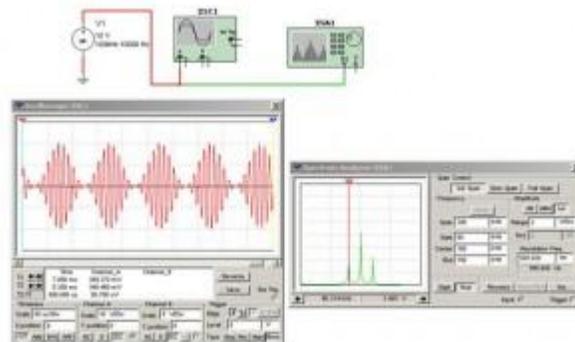


Figura 4.65 El mismo análisis de espectro con mayor resolución

La conclusión más importante es: una emisión de AM ocupa una banda de frecuencias y no una frecuencia portadora y dos frecuencias inferior y superior, porque la voz humana o la música poseen todas las frecuencias entre 0 y 5 y entre 0 y 20 KHz y entonces las frecuencia laterales únicas se transforman en una banda difusa, a medida que se analiza la modulación.

### 4.3 Equipos especiales de medición

Si quisiéramos realizar un experimento en el que nos interese registrar el cambio de la temperatura de un objeto en función del tiempo, lectura “visual” y analógica que provee un galvanómetro no resulta práctica a la hora de intentar adquirir las mediciones en forma automática, sin la intervención humana.



*Galvanómetro a aguja*



*Graficador del tipo XY*



*Osciloscopio analógico*

Este proceso de medición presentaba una serie de inconvenientes. Primeramente dependía de la agudeza visual del observador, ya que podía cometer errores de apreciación (observando mal los números) o de paralaje (al no mirar bien enfrente el indicador que fija el número sobre la escala graduada) y, finalmente, podía equivocarse al anotar el número en su bitácora. Por otra parte, *¿cuántas mediciones podría realizar a lo largo de una hora o durante varios días, tratando de captar la evolución de un determinado proceso? ¿Con qué minuciosidad registraría la forma de una curva, perdiendo eventualmente detalles de importancia?*

Para lograr los propósitos buscados, se emplea un transductor, que es un dispositivo que convierte las variaciones de los parámetros a medir en señales eléctricas. El efecto producido por un elemento primario puede ser un cambio de presión, fuerza, posición, medida eléctrica, etc.

*Para el ejemplo de la balanza, podríamos emplear un material piezoeléctrico que tiene la propiedad de producir una diferencia de potencial al aplicarle una deformación mecánica. Así, la compresión producida por el peso del objeto a pesar será traducida proporcionalmente a un voltaje.*

Definitivamente para las mediciones de magnitudes físicas las señales eléctricas son más fáciles de manejar. Las señales eléctricas tienen la ventaja de que pueden ser adquiridas mediante registradores XY. Estos equipos, comúnmente empleados en los tradicionales sismógrafos o para obtener electroencefalogramas, tienen una punta (o varias) cuyo desplazamiento vertical, es proporcional al voltaje entrante, se dibuja en un papel que es arrastrado a velocidad constante y que representa el paso del tiempo. Como su nombre lo indica, estos equipos también permitían graficar una variable (Y) en función de otra (X) y obtener así, sobre papel, la función Y(X). El osciloscopio (tubo de rayos catódicos) inventado a fines del siglo XIX, también es un graficador XY cuyos registros podían ser guardados mediante fotografías de su pantalla, pero con la gran ventaja adicional de que permitió acceder a la medición de señales de alta frecuencia o de pulsos de muy corta duración (inicialmente ms,  $\mu$ s en los 70, ns en 2001).

#### 4.3.1 Graficadores-registradores.

Gráfica es una palabra de origen griego, cuya etimología proviene del prefijo *grapho*, que significa escritura. Ahora, una definición de una **gráfica** es una representación de datos (resultados de una medición),

generalmente numéricos, mediante recursos que manifiesten visualmente la relación de dependencia que guardan entre sí.

Lo más común en la mayoría de los procesos de medición es plasmar en coordenadas cartesianas por medio de un conjunto de puntos o signos que sirven para analizar el comportamiento de un proceso y permiten la interpretación de un fenómeno. Se trata de una forma de comunicación visual de gran impacto.



Existen diferentes tipos de gráficas:

**Gráfica lineal:** se utilizan dos ejes cartesianos perpendiculares entre sí. Las gráficas lineales se recomiendan para representar series en el tiempo.

**Gráfica de barras:** contiene barras verticales que se usa cuando se pretende resaltar la representación de porcentajes de datos que componen un total, la diferencia de frecuencias o de la intensidad de la característica numérica de interés.

**Histograma:** se emplea para ilustrar muestras agrupadas en intervalos. La altura de cada rectángulo es proporcional a la frecuencia del intervalo respectivo.

**Gráfica circular:** permite ver la distribución interna de los datos que representan un hecho, en forma de porcentajes sobre un total.

**Pictograma:** Se utilizan símbolos de tamaño proporcional al dato representado.

#### **4.3.1.1 Importancia de la representación gráfica de datos experimentales**

La presentación y análisis de los resultados debe considerarse como parte integral de los experimentos. Es muy útil que los datos obtenidos se presenten en una gráfica, donde quede resumida la información para su apreciación y análisis. En la mayoría de los casos una gráfica es más útil que una tabla de valores, especialmente en los casos en que:

Los experimentos se llevan a cabo midiendo una variable  $Y$  en función de otra  $X$  que se varía independientemente y se quiere interpretar la relación funcional entre ellas. Por ejemplo: la medición de la corriente en un circuito en función de la diferencia de potencial aplicada.

En que la información que se quiere representar quede expuesta de una manera lo suficientemente clara y explícita como para que la representación gráfica “hable por sí sola”. Lo importante es que un gráfico debe servir para un posterior tratamiento de los datos, que lleve a inferir las leyes subyacentes en ellos y ahondar así en las posibles implicaciones y generalizaciones de los resultados obtenidos en los experimentos.

#### **Un Ejemplo.**

Un oleoducto se rompe en el mar, y el derrame de petróleo se extiende mientras la rotura no se arregla. Desde un avión se toman fotografías cada día. En la figura 5 se muestra una secuencia de fotografías diaria

superpuestas. Obtener a partir de los datos una “ley de crecimiento” de la mancha (definir cómo varía “el radio” de la mancha en función de los días que transcurren (un día → un tono).

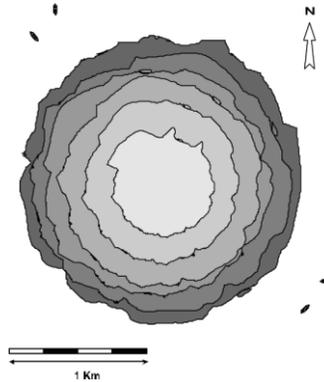
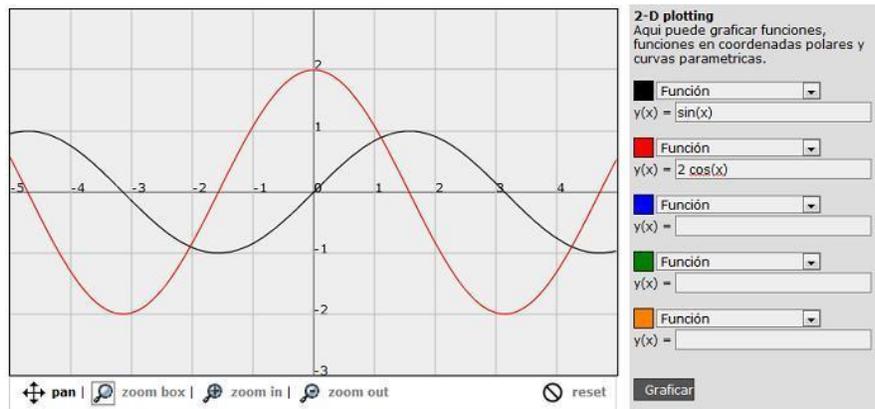


Figura 5: Fotografías de la mancha de petróleo en agua, cada tono indica un día diferente.

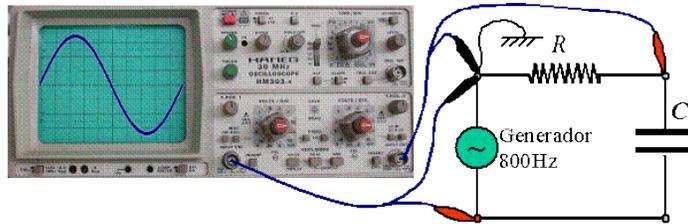
El proceso que se sigue para construir una gráfica puede ser:

- Manual. Con la información obtenida de los experimentos por medio de diversos instrumentos de medición, se elaboran tablas de datos, a partir de las cuales pueden construirse las gráficas.
- Por medio software. Deben usarse instrumentos digitales que procesen la medición de forma digital. Con la computadora y el software apropiado se procesa la información para lograr gráficas de diversos tipos.



En estos tiempos modernos los graficadores de ecuaciones matemáticas se pueden encontrar incluso de manera *online* en Internet; uno de los más sencillos y prácticos que existen es el llamado **FooPlot**, el cual se puede encontrar en su página oficial de Internet. En dicha página se podrá graficar un sin número de funciones, es una excelente herramienta para diversos proyectos, ejemplos o ejercicios escolares.

c) Uso de instrumentos que directamente construyen la gráfica para mostrar y registrar el comportamiento del valor de la medición con respecto a otro parámetro. Este tipo de instrumentos han sido identificados en los procesos de medición como **graficadores**. En mediciones eléctricas el más común es el osciloscopio.



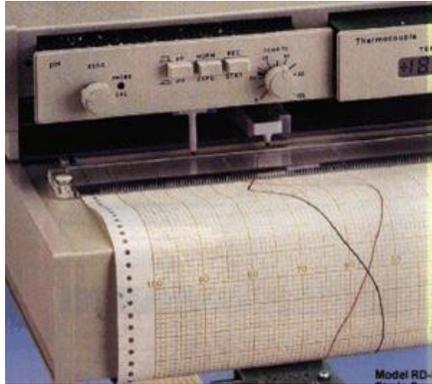
Los graficadores han evolucionado por el tipo de sensores que usan para realizar las mediciones (inicialmente eran mayormente electromecánicos, hasta que actualmente, la mayoría usan sensores con semiconductores). También con ello han evolucionado sus aplicaciones, puesto que además de ser aparatos de medición, son de registro de la información en forma gráfica o en digital, y pueden servir como elementos de control de variables de procesos. Por ejemplo, el osciloscopio digital.

Actualmente los graficadores se desarrollan con base a programas informáticos manejados por computadoras, estos programas permiten obtener gráficas en impresoras. Los graficadores reciben nombres específicos de acuerdo al tipo de variables que manejen, por ejemplo para la medición de actividades sísmicas, los sismógrafos. Hay aparatos médicos como:

- **Electroencefalógrafo.** El electroencefalograma (EEG) es el registro gráfico de la actividad eléctrica de las neuronas del encéfalo. Los electrodos se conectan por medio de cables a un amplificador y a una máquina de registro. La máquina de registro convierte los impulsos eléctricos en patrones que se pueden observar en la pantalla de una computadora y se pueden igualmente guardar en un disco de computadora.
- **Electrocardiógrafo.** Aparato electrónico que capta y amplía la actividad eléctrica del corazón a través de electrodos colocados en las 4 extremidades.
- **Ecógrafo.** La ecografía es un procedimiento de diagnóstico usado en los hospitales que emplea el ultrasonido para crear imágenes bidimensionales o tridimensionales. Instrumento muy similar a un "micrófono" llamado transductor emite ondas de ultrasonidos. Estas ondas sonoras de alta frecuencia se transmiten hacia el área del cuerpo bajo estudio, y se recibe su eco. El transductor recoge el eco de las ondas sonoras y una computadora convierte este eco en una imagen que aparece en la pantalla.
- **Tomógrafo computarizado.** La TC obtiene múltiples imágenes al efectuar la fuente de rayos X y los detectores de radiación movimientos de rotación alrededor del cuerpo. La representación final de la imagen tomográfica se obtiene mediante la captura de las señales por los detectores y su posterior proceso mediante algoritmos de reconstrucción.

#### 4.3.1.2 Graficadores-registradores de cinta.

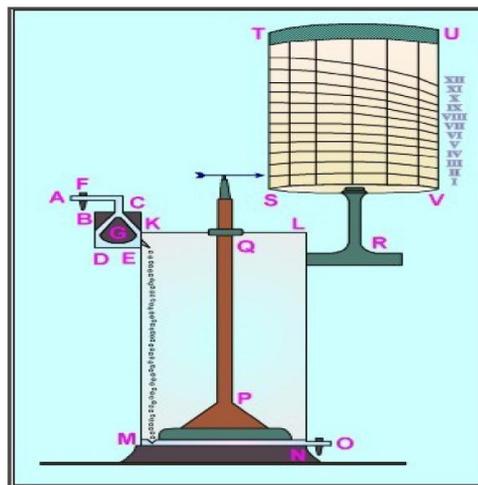
Son instrumentos usados para registrar diversos procesos y señales eléctricas. Los más tradicionales registran los datos en papel.



Registadores de gráficos con impresión a papel de tipo punto con 2 y 6 canales análogos universales, el último incluye protección contra el ingreso de agua.

#### 4.3.1.2.1 El reloj de agua de Ktsibios (300 años A.C.).

En la figura se muestra uno de los primeros registradores gráficos que se registran históricamente, el cual medía el tiempo por medio de un graficador y registrador que operaba con un pequeño chorro de agua fluía a velocidad constante dentro de un recipiente. El mismo poseía un flotador que iba subiendo a medida que transcurría el tiempo y estaba conectado a una punta que imprimía su huella en un cilindro que rotaba a velocidad constante. Para asegurar que el caudal de agua que caía al tanque fuera constante, Ktsibios inventó un regulador de flujo semejante al usado en los motores modernos. Entre el suministro de agua y el tanque colector había una regulación de caudal de agua por medio de una válvula flotante que mantenía el nivel constante. Si el nivel se elevaba (como resultado de un incremento en la presión de suministro, por ejemplo), el flotador se elevaba restringiendo el caudal de agua que pasaba al recipiente regulador hasta que el flotador volvía a un nivel específico.

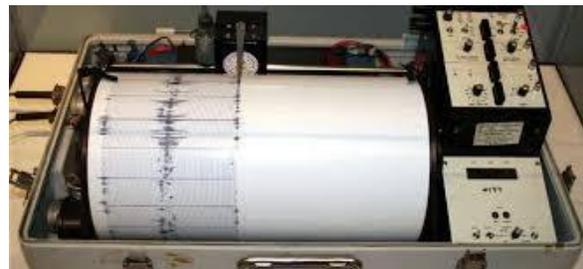
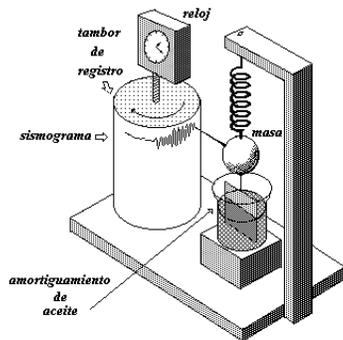


Reloj de agua de Ktsibios

#### 4.3.1.2.2 El sismógrafo.

Un sismógrafo es un instrumento usado para medir movimientos de la Tierra. Se basa en el principio de inercia de los cuerpos, como sabemos este principio nos dice que todos los cuerpos tienen una resistencia a modificar su estado de reposo o a variar su velocidad. Así, el movimiento del suelo puede ser medido con respecto a la posición de una masa suspendida por un elemento que le permita permanecer en reposo por algunos instantes con respecto al suelo. El mecanismo consiste usualmente en una masa suspendida de un resorte atado a un soporte acoplado al suelo, cuando el soporte se sacude al paso de las ondas sísmicas, la inercia de la masa hace

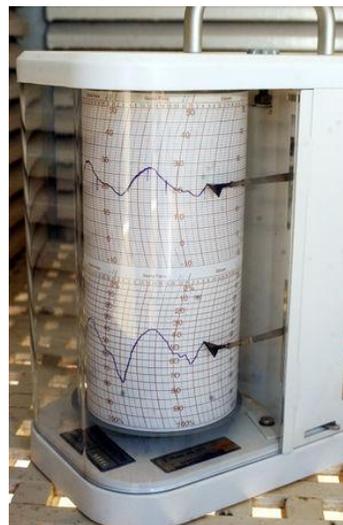
que ésta permanezca un instante en el mismo sitio de reposo. Posteriormente cuando la masa sale del reposo, tiende a oscilar. Sin embargo, ya que esta oscilación posterior del péndulo no refleja el verdadero movimiento del suelo, es necesario amortiguarla. En la figura de la derecha se ha representado un aparato en el que el amortiguamiento se logra por medio de una lámina sumergida en un líquido (comúnmente aceite). Este era el método utilizado en los aparatos antiguos, actualmente se logra por medio de bobinas o imanes que ejercen las fuerzas amortiguadoras de la oscilación libre de la masa. Si se sujeta un lápiz a la masa suspendida, para que pueda inscribir en un papel pegado sobre un cilindro que gira a velocidad constante, se podrá registrar una componente del movimiento del suelo. El instrumento hasta aquí descrito, detecta la componente vertical del movimiento del suelo y se conoce como sismógrafo vertical. El papel donde traza el movimiento se conoce como sismograma.



El sismógrafo y el sismograma

#### 4.3.1.2.3 El termohigrógrafo

El termohigrógrafo (*termo*: temperatura, *higro*: humedad) es un aparato que registra en una gráfica las temperaturas y la humedad relativa. Es un equipo esencial para el estudio del clima. Es importante saber la temperatura máxima o mínima, pero quizás es más interesante saber a qué hora se ha producido ésta; lo mismo pasa con la humedad.



##### 4.3.1.2.3.1 Características del instrumento.

Usualmente el sensor de temperatura es una Placa bimetalica que por acción de la variación de la temperatura del aire genera una dilatación / contracción en las placas. Al ser de metales con diferente coeficiente de

dilatación provocan un movimiento que es transmitido a un brazo. Este contiene en su extremo una pluma con tinta que traza en la banda de papel la temperatura.

El sensor de humedad relativa está formado por un atado de crines de caballo o similar que es muy sensible a la variación de la humedad atmosférica. De manera similar al caso de la temperatura se transmite el movimiento al brazo que con la pluma traza el papel.

Es un instrumento mecánico que posee en la base del tambor un mecanismo de relojería para que lo haga girar. Posee un engranaje doble calibrado para que de un giro completo en un día o una semana. La banda de papel posee un preimpreso con los días o las horas del día y la humedad relativa en % y la temperatura en °C. O unidades según sistema de medida.

#### **4.3.1.3 Graficadores-registradores circulares.**

Registra datos en forma circular. Este tipo de gráfico que también se denomina gráfico polar o de reloj, se utilizan para representar características periódicas, como todas las informaciones que presenten alguna variabilidad a lo largo de aun a meses del año. Las graficas están diseñadas para girar en periodos de 1 hora, 24 horas, 7 días, etc.



**Graficador de humedad-temperatura de 8" modelo TH800 marca Dickson**

Este graficador conforma una cadena de medición-registro termométrica compuesta por una sonda de temperatura con sensor de termopar, de termo-resistencia o de termistor que actúa sobre la pluma formando el diagrama final. Estos son utilizados para control de calidad, aplicación de alguna sustancia a cierta temperatura o monitoreo en fábricas.

#### **4.3.1.4 Graficadores-registradores sin papel.**

Los graficadores sin papel son los graficadores más recientes que han llegado al mercado. Los graficadores sin papel muestran la gráfica en la pantalla del graficador en lugar de imprimir la gráfica en papel. Los datos normalmente se pueden guardar en la memoria interna o en una tarjeta de memoria para transferirlos posteriormente a una computadora. El beneficio más importante de los graficadores sin papel es que no se consume papel y los datos se transfieren fácilmente a una computadora.

#### 4.3.1.4.1 Graficador digital sin papel LBVR1706



**Graficador digital sin papel LBVR1706 con pantalla de 6.4" (VGA TFT)**

Tienen pantalla de 6.4" (VGA TFT) con resolución de 640x480 píxeles. Posee 6 slots<sup>7</sup> con tecnología plug-&-play (en español "enchufar y usar") para tarjetas I/O (entrada-salida) con un máximo de 6 canales de entradas análogas. Se pueden montar en panel o manejarse de manera portátil.

Posee varios formatos de visualización y teclas de fácil acceso que permiten el monitoreo y la configuración más sencilla. Los datos pueden visualizarse en sitio, o desde un lugar remoto a través de la interfaz Ethernet o por normas de comunicación RS-232, RS-485, RS-422. Los registros históricos pueden ser almacenados en memoria ROM, memoria USB o en una PC para su evaluación o su impresión.

Puede ser usado en aplicaciones para monitorear, almacenar y evaluar procesos en plantas químicas, de alimentos y bebidas, petroquímicas, de semiconductores, automotriz, de monitoreo del medio ambiente o laboratorios.



**Tendencias verticales, datos numéricos o combinados**

<sup>7</sup> Ranura de expansión: en informática, conector o puerto de expansión en la placa base.

### 4.3.2 El trazador de curvas

Un trazador de curvas es un instrumento de medición el cual tiene por objetivo obtener las curvas características de elementos tales como los resistores, diodos, transistores, etc.

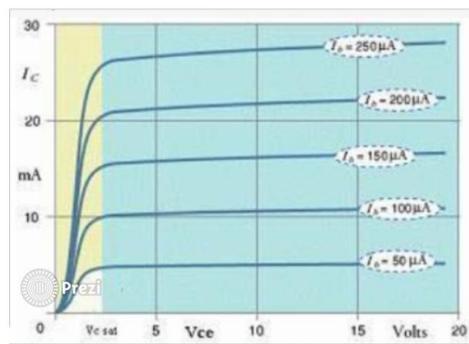


En la actualidad existen muchos trazadores de curvas, algunos se enfocan en solo determinar las curvas de un solo elemento, mientras que otros buscan poseer más características, por lo general estas funciones se ven beneficiadas u opacadas por el precio de dichos instrumentos.

El principio de funcionamiento de un trazador de curvas para un transistor BJT se basa en que este aplicará una corriente constante en la base y una rampa de voltaje en el colector, esto provocará que el valor de " $V_{CE}$  varíe" y al mismo tiempo medirá la  $I_C$ . Para funcionar el trazador de curvas requiere de 2 fuentes de voltaje, 2 medidores de voltaje y un medidor de corriente.

A continuación se explica de manera más ilustrativa qué es un trazador de curvas, cuál es su función, de qué se compone, como se opera y más.

El trazador de curvas es un instrumento el cual muestra el funcionamiento de los dispositivos electrónicos por medio de la presentación de sus curvas características que comúnmente son usados en circuitos en una pantalla de un tubo de rayos catódicos o de una pantalla semiconductora. Se toma cualquier parámetro físico, como el voltaje, la corriente eléctrica, la temperatura, etc., para analizar su comportamiento con respecto a otro parámetro. Esencialmente tiene el mismo principio de funcionamiento que un osciloscopio, aunque además también contiene fuentes de corriente y voltaje que se pueden utilizar para estimular al dispositivo bajo prueba.



#### 4.3.2.1 El trazador de curvas HM6042



**El trazador de curvas HM6042 y el Adaptador HZ820: Para la selección rápida de transistores conmutable entre DUT1 y DUT2 (Utest máx. 40 V)**

El trazador de curvas HM6042 utiliza tecnología para el análisis fácil de los parámetros característicos de semiconductores individuales.

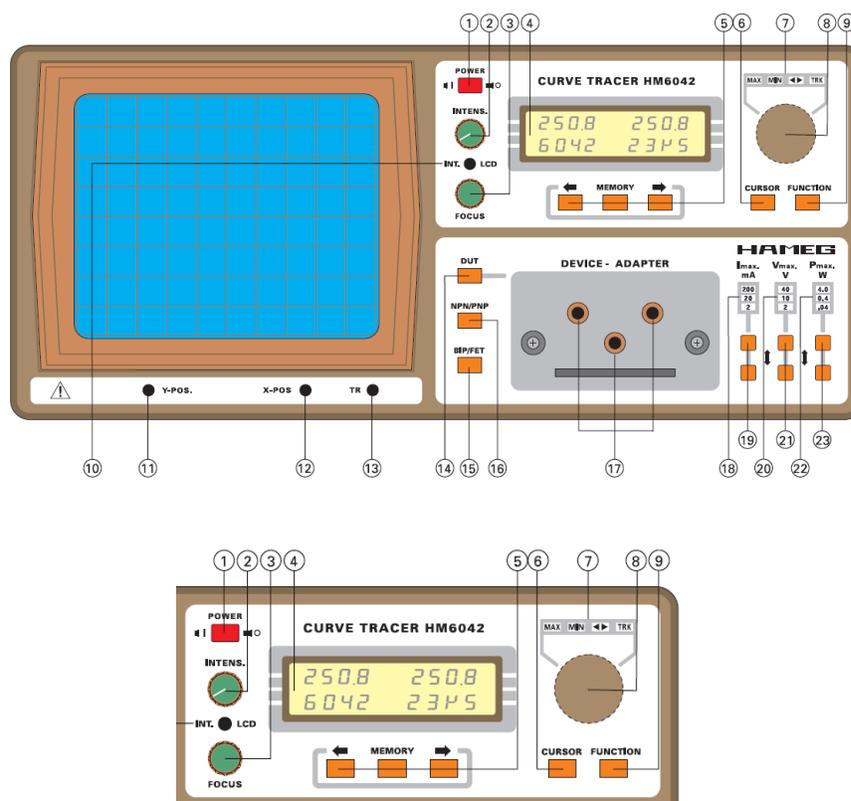
Los valores medidos se digitalizan y se presentan sobre la pantalla en forma de un conjunto de curvas. Todos los valores y resultados numéricos se pueden leer en el display de LCD. La concepción del HM6042 permite su utilización para el análisis de componentes individuales o en serie en el campo industrial. Los campos característicos de transistores BJT y de transistores de efecto de campo se representan como conjunto de curvas con 5 líneas en el 1er cuadrante. También se pueden analizar diodos, Led's y tiristores en sus especificaciones básicas. Mediante las funciones de cálculo que están implementadas en el aparato se pueden obtener de una manera muy simple los parámetros  $h$  e  $y$ .

Las funciones de cálculo y de medida del aparato permiten la toma del cálculo preciso de tensión de base, corriente de base, tensión de colector, corriente de colector así como amplificación de corriente. Los valores obtenidos se pueden observar sobre la pantalla de LCD. La elección del valor de medida se determina de forma muy práctica con las teclas.

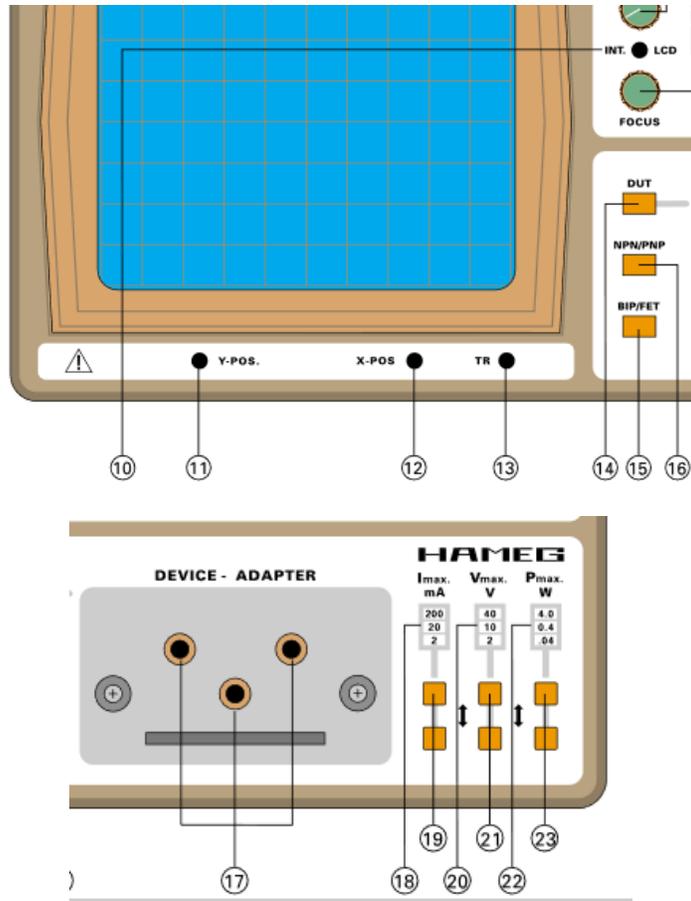
Además se pueden calcular directamente los parámetros dinámicos  $h_{11}$ ,  $h_{21}$ ,  $h_{22}$ ,  $y_{21}$ ,  $y_{22}$ . Sobre el conjunto de curvas se pueden marcar puntos de medida mediante cursores, determinando el microprocesador del HM 6042 en el punto indicado los parámetros estáticos y dinámicos. El tiempo de cálculo corto y la secuencia rápida de las medidas, permiten la realización ininterrumpida de trabajos con el HM 6042. Se pueden memorizar valores de medida individuales mediante una tecla en la memoria del 6042. Así se pueden efectuar comparaciones entre 2 semiconductores semejantes.

Sus características profesionales y su fácil manejo, permiten que el trazador de curvas HM 6042 sea un aparato que corresponda a las elevadas exigencias de un laboratorio o en la producción en el campo de la electrónica.

#### 4.3.2.1.1 Mandos de Control.



- (1) POWER (Apagar/encender)
- (2) INTENS. Ajusta la intensidad de luminosidad del trazo
- (3) FOCUS Ajuste para la nitidez del trazo
- (4) INDICADOR LC. Display LCD de 2 líneas, presenta los valores de medida numéricos y la indicación de los parámetros ajustados
- (5) MEMORY (tecla). Tecla para la memorización de un valor de medida y la activación de la indicación de valores de diferencia.
- (6) CURSOR (Tecla). Tecla para variar el cursor de una línea característica a otra.
- (7) TRK/ ◀▶ /MIN/MAX(LEDs) Indicación de la función elegida con (8).
- (8) Conmutador rotatorio, varia los parámetros de las líneas  $I_B$  y  $V_G$  y de la posición del cursor.
- (9) FUNCTION (Tecla). Tecla para la elección de las funciones de (8).
- (10) INT. LCD. Ajusta el contraste del LCD.
- (11/ 12) Y-POS X-POS. Ajuste de posición del grupo de líneas en la pantalla.
- (13) TR. Ajuste para la corrección de la rotación del trazo
- (14) DUT (tecla). Conecta/ desconecta el componente bajo prueba.
- (15) BIP/FET (tecla). Tecla para elegir entre transistores bipolares o de efecto de campo.
- (16) NPN/PNP (tecla). Tecla para elegir entre transistores NPN o PNP.



(17) E/S; C/D; B/G (bornes). Bornes de conexión para adaptadores de test para el componente a probar.

(18) 200, 20, 2mA (LEDs). Indica la gama de corriente selecc. ( $I_C / I_D$ ).

(19)  $I_{max}$ . (tecla). Selecciona la corriente de medida máxima.

(20) 40, 10, 2V (LEDs). Indica la gama de tensión selecc. ( $V_C / V_D$ ).

(21)  $V_{m\acute{a}x}$ . (tecla). Selecciona la tensión de medida máxima.

(22) 4, 0.4, 0.04W (LEDs). Indicación de la gama de potencia seleccionada.

(23)  $P_{max}$ . (tecla). Tecla para la selección de la potencia de medida máxima

#### 4.3.2.1.1 Indicaciones de funcionamiento.

Para el funcionamiento del HM6042 no se precisan conocimientos previos. La clara estructuración de la carátula frontal y la limitación a funciones esenciales permiten trabajar eficientemente después de la primera puesta en marcha.

Como medida de protección para los componentes acoplados, se han preajustado los siguientes valores al conectar el aparato:

$I_{max} = 2 \text{ mA}$ ;

$U_{max} = 2 \text{ V}$ ;

$P_{max} = 0.04 \text{ W}$ ;

$I_B = \text{ca. } 0.4 \mu\text{A}$

( $V_G = -0 \text{ V N-FET}$ ;  $+10 \text{ V P-FET}$ ).

#### 4.3.2.1.2 Conexión de los componentes

Después de encender el HM6042 aparece una línea horizontal al borde inferior de la pantalla si no se ha conectado ningún DUT (Device Under Test). Un punto más claro indica la posición actual del cursor.

El adaptador adjunto es idóneo para la conexión y comparación de 2 transistores. Los DUTs pueden conectarse de forma alternada mediante el conmutador del adaptador a la entrada del HM6042. Los bornes de banana 17 del adaptador quedan descritos con E/S Emitter/Source, C/D Colector/Drain y B/G Base/Gate. Los diodos deben conectarse para las mediciones entre las conexiones de E y C. Los tiristores pueden ser disparados con una corriente inicial de máx. 10mA . Sin embargo, la presentación de las curvas características de tiristores es limitada.

Para la conexión de los componentes que se deseen comprobar es aconsejable utilizar el adaptador suministrado. Si no se pueden conectar a este los componentes deseados, es posible conectar también los objetos de test mediante un cable con el HM6042. La longitud de un conductor simple no debe sobrepasar los 25cm

#### 4.3.2.1.3 Elección del tipo de componente.

Correspondiendo a la clase del DUT se tiene que ajustar el HM6042. Si por ejemplo se utiliza un transistor NPN bipolar se deben ajustar las teclas 15 y 16 correspondientemente (sin pulsar). En los transistores PNP se debe conmutar la elección mediante la tecla 16 . La elección de FETs se realiza mediante la tecla BIP/FET 15 . Los diodos se miden con el ajuste FET de la tecla 15 . Los tiristores se miden también con un ajuste como el de los transistores bipolares 15. En el display 4 se puede ver el tipo de transistor seleccionado. Para presentar el conjunto de curvas medido, se tiene que pulsar la tecla DUT 14. Sólo ahora se activa una medición. Si no se activa esta tecla aparece sobre el display del HM6042 la indicación OUTPUT OFF.

#### 4.3.2.1.4 Presentación del conjunto de curvas.

El grupo de curvas de un transistor (5 curvas características) ocupa, en la pantalla una superficie de 8 x 10 divisiones (figura 1). La división de los ejes en dirección vertical y horizontal es lineal. La presentación del grupo de curvas se ha dividido de tal manera que los valores límite de margen ( $I_{max} = 200/20/2$  mA;  $U_{máx} = 40/10/2V$ ) correspondan también a los puntos finales de las curvas, o al límite superior de la pantalla. Por ejemplo, para el ajuste de máximo 20 mA para la corriente del colector, la línea horizontal superior de la retícula de la pantalla indica el valor de 20 mA.

Con la elección de esta corriente máxima se obtiene una desviación vertical de 2,5 mA/div. Lo mismo se obtiene con el ajuste de la tensión de colector. Con un ajuste de 40 V para la tensión de colector esta significa, que la limitación vertical derecha del grupo de curvas de una tensión del colector de 40 V, corresponde a 4 V/div en horizontal. Si se eligen los valores límite más pequeños, también es válido lo arriba descrito.

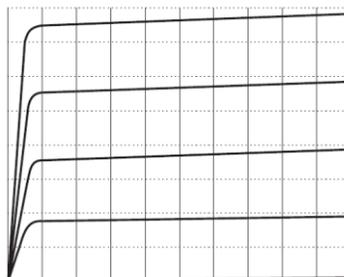


Figura 1

Con el conmutador 23 se preelige la potencia máxima. Esta curva corresponde a una hipérbola que corta los valores máximos para corriente y tensión. La forma de la hipérbola queda visible, cuando los valores del DUT son inferiores a los valores máximos controlables por el HM6042 (figura 2).

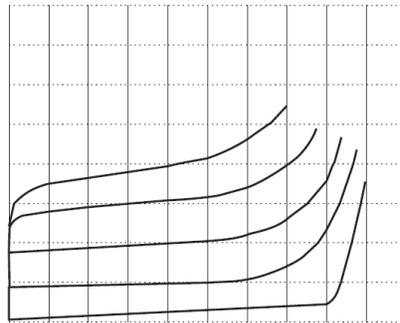


Figura 2

Para la distancia de las curvas características la característica  $I_C = f(U_{CE})$ , es esencial el parámetro  $I_B$ . La corriente de base y también la separación de las curvas características se pueden variar mediante el mando giratorio 8. En el ajuste base queda activada la función MAX 7. Mediante el conmutador giratorio se puede variar la curva característica superior en su posición variando la corriente base. Se puede desplazar hacia corrientes mayores o menores. Las tres curvas características entre la superior y la inferior se van adaptando correspondientemente en la distancia. Si se activa la función MIN 7, se puede variar la curva característica inferior en su posición variando la corriente de base. Se puede desplazar hacia corrientes menores o mayores. Las tres curvas características entre la superior y la inferior se van adaptando correspondientemente en la distancia.

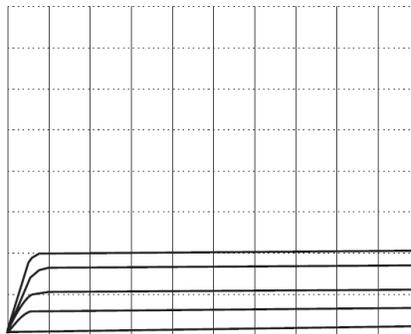


Figura 3

En la primera puesta en marcha la corriente base está ajustada en un mínimo (figura 3). El ajuste del ancho de paso/posición de la curva, cuando se elige la función MAX ó MIN se puede realizar en tres márgenes.

Se debe tener en cuenta en cada margen un offset, con una magnitud de medio ancho de paso. Para poder variar fácilmente del margen inferior al superior se debe accionar el mando giratorio en dirección de las manecillas del reloj. Durante el traspaso del paso 127 al paso 128 se realiza un cambio de margen, correspondiendo los primeros cinco pasos del margen nuevo a los últimos cinco pasos del margen antiguo. Durante el cambio de margen se multiplica la corriente de base por el factor 10. Se debe tener en cuenta que no se puede llegar al margen 3 (corriente de base de 10 mA), mientras esté elegida la corriente máxima del colector de 2 mA mediante el conmutador 19.

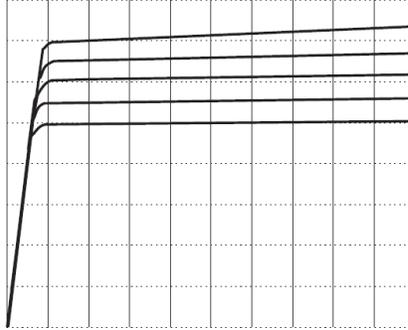


Figura 4

Para llegar al margen inferior con pasos prácticamente fluidos, se debe elegir mediante el conmutador 9 la función MIN y accionar el conmutador giratorio 8 en dirección contraria a las manecillas del reloj. Accionando el conmutador giratorio con la función MIN elegida, se desplaza la situación de la línea característica inferior hacia arriba (ver figura 4).

Si se pone en marcha el HM6042 y no se tiene conectado ningún componente, aparece sobre la pantalla una línea horizontal. Si se conecta un transistor NPN bipolar y se activa la medición mediante una pulsación sobre la tecla DUT 14 aparece un grupo de curvas con 5 curvas similar a las de la figura 3.

Se han elegido los ajustes de los valores máximos así que el DUT reciba la mínima carga posible (2mA; 2V; 0,04 W). Si se utiliza, p.ej., un transistor NPN como prueba pero se elige como tipo de prueba un PNP, el HM6042 desconecta la salida, después de un breve control de la pieza. Sobre el display aparece la notificación OUTPUT OFF.

#### 4.3.2.1.5 Elección de los parámetros

Básicamente se diferencian si se caracterizan parámetros de los transistores estáticos y dinámicos. Mediante las teclas  $\leftarrow \rightarrow$  5 se eligen las magnitudes que se desean medir. El valor de los parámetros elegidos de esta manera se mide en la posición en la que se encuentra el cursor, se calcula y se indica a través del display digital 4. Se pueden obtener con el HM6042 los siguientes parámetros:

##### a) Parámetros estáticos

$V_B / V_G$  Tensión base/gate

$I_B / I_G$  Corriente base/gate

$I_C / I_D$  Corriente colector/drenaje

$V_C / V_D$  Tensión colector/drenaje

$\beta$  Amplificación de corriente

##### b) Parámetros dinámicos

$h_{11}$  Impedancia de entrada cortocircuito

$h_{21}$  Amplificación de corriente cortocircuito

$h_{22}$  Conductancia de salida sin carga

$y_{21}$  Transductancia directa

$y_{22}$  Conductancia de salida cortocircuito

#### 4.3.2.1.6 Utilización de las funciones de memoria MEM

El HM 6042 ofrece una función de memorización muy útil para la selección de transistores. A través de la tecla MEM, se pueden memorizar los parámetros de un transistor y compararlos así con otro componente del mismo tipo.

#### 4.3.2.1.7 Ejemplos de aplicación. Transistores bipolares.

1. Conecte el componente a comprobar con la entrada correspondiente 17 .
2. Asegúrese que la tecla Bip/FET 15 no esté pulsada.
3. Seleccione el tipo de transistor (NPN/PNP) con la tecla NPN/PNP 16 .
4. Ajuste los márgenes para la corriente  $I_{max}$  19 , tensión  $U_{max}$  21 y la potencia  $P_{max}$  23 .
5. Pulse la tecla DUT 14 para comenzar con la medida.
6. La posición vertical de las curvas características  $I_C = f(U_{CE})$  depende de la corriente de base  $I_B$ . La corriente de base y con ello también la distancia entre las curvas características se pueden variar mediante el botón 8 si se ha activado la función MAX respectivamente MIN 7 . Con el mando se puede variar la posición de la curva superior e inferior variando la corriente de base. La corriente de base está preajustada a mínimo al encender el aparato.
7. Con las funciones del cursor se seleccionan los parámetros calculados con las teclas  5 y se representan en el display 4 .

#### 4.3.2.1.8 Presentación de las curvas características para transistores de efecto de campo

Si se quieren comprobar FETs se ha de pulsar la tecla BIP/FET 15. El parámetro para desplazar las curvas características es la tensión de puerta  $U_G$ . Correspondiendo al uso y la presentación de transistores bipolares, se puede variar la tensión de puerta después de seleccionar las funciones MAX o MIN 7 en pasos con el botón 8. Son 256 pasos con una tensión entre  $-10V$  y  $+10V$ . Correspondiendo a esto cada paso es de 80 mV. Con el botón 8 se puede aumentar el número de pasos de forma que se pueda reconocer el grupo de curvas.

#### 4.3.2.2 Uso del Analizador IV del programa MULTISIM como trazador de curvas.

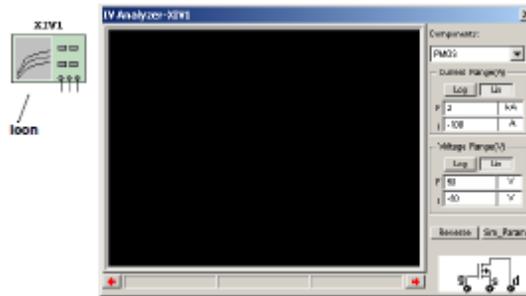
El Analizador IV se utiliza para trazar las curvas de corriente-tensión de los siguientes dispositivos:

- Diodo
- PNP BJT
- NPN BJT
- PMOS
- NMOS.

Nota: El Analizador I-V mide componentes individuales que no estén conectados en un circuito. Se pueden medir dispositivos que ya están en circuitos desconectándolos primero.

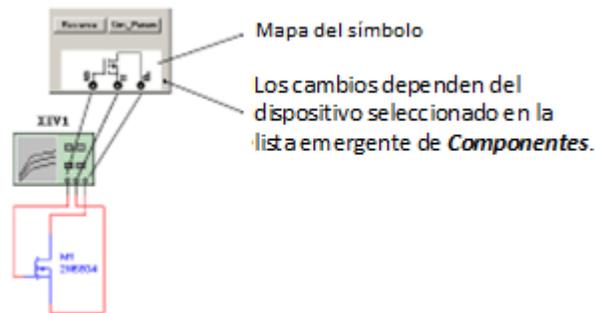
Para utilizar el Analizador I-V para medir las características de un dispositivo, debemos:

1. Hacer clic en el botón de la herramienta Analizador I-V, colocar su icono en el área de trabajo y hacer doble clic en el icono para abrir el instrumento.
2. Seleccionar el tipo de dispositivo que se desea analizar en la lista desplegable **Componentes**. Por ejemplo, seleccionamos PMOS.



Nota: En este ejemplo se analiza un FET PMOS.

3. Coloque el dispositivo deseado en el área de trabajo y conéctelo al Analizador IV siguiendo el mapa simbólico que se muestra en la cara del instrumento.



Nota: Si está comprobando un dispositivo que ya está en un circuito, desconéctelo del circuito y conéctelo al Analizador IV como se muestra arriba.

4. Haga clic en *Simulate param* para mostrar el cuadro de diálogo *Simulate parameters*.

Nota: El contenido de este cuadro de diálogo cambia según el dispositivo seleccionado en la lista emergente **Componentes**. Para obtener más información sobre cómo aparece este cuadro para otros dispositivos, consulte "Cuadro de diálogo de **Simulate Parameters**" en la página 8-58.

Opcionalmente, cambie los ajustes predeterminados para  $V_{ds}$  (voltaje de drenaje-fuente) que aparecen en los siguientes campos en el cuadro de **Source Name: V<sub>ds</sub>**.

- **Arrancar**-ingrese el  $V_{ds}$  de inicio deseado para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha.
- **Parar**-ingrese el  $V_{ds}$  de parada deseado para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha.
- **Incremento**-introduzca el tamaño deseado de los pasos de  $V_{ds}$  para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha. Los puntos formados por estos pasos serán los puntos en los que se calcularán las mediciones para formar la (s) curva (s) en la gráfica.

Opcionalmente, cambie la configuración predeterminada para  $V_{gs}$  (voltaje compuerta-fuente) que aparecen en los siguientes campos en el cuadro de **Source Name: V<sub>gs</sub>**:

- **Start**-ingrese el Vgs de inicio deseado para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha.
- **Parar**-ingrese el Vgs de parada deseado para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha.
- **Num de pasos**- ingrese el número de pasos deseado de Vgs para el barrido. Habrá una curva para cada valor de Vgs.

Casilla de verificación **Normalizar datos**: muestra los valores de Vds en las curvas (eje x) con valores positivos.

Haga clic en Aceptar (**OK**) para guardar la configuración y volver al cuadro de diálogo principal del Analizador I-V.

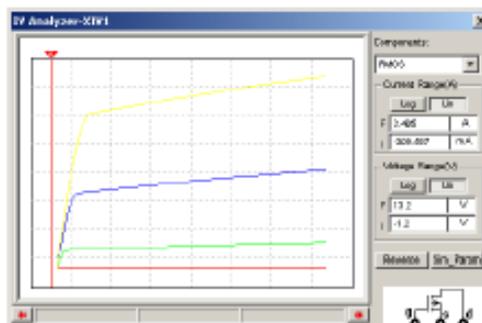
5. Opcionalmente, cambie los botones de escala predeterminados en las cajas del **Rango de Corriente (A)** y el Rango de Voltaje (V) desde **Lin** (lineal) a **Log** (logarítmica). En este ejemplo, ambos ajustes se dejaron en Lin.

Nota: No es necesario cambiar los ajustes de intensidad y tensión F (final) e I (inicial).

Después de ejecutar la simulación, estos campos se rellenan para que las curvas se muestren completamente.

Consulte "Revisión de Datos del Analizador IV" en la página 8-62 para obtener información de los cambios de estos campos para ver áreas específicas de la curva.

6. Seleccione **Simular / Ejecutar**. Se muestran las curvas I-V del dispositivo. Si lo desea, haga clic en invertir para cambiar la pantalla a un fondo blanco.



Nota Véase también "Revisión de los datos del Analizador I-V" en la página 8-62.

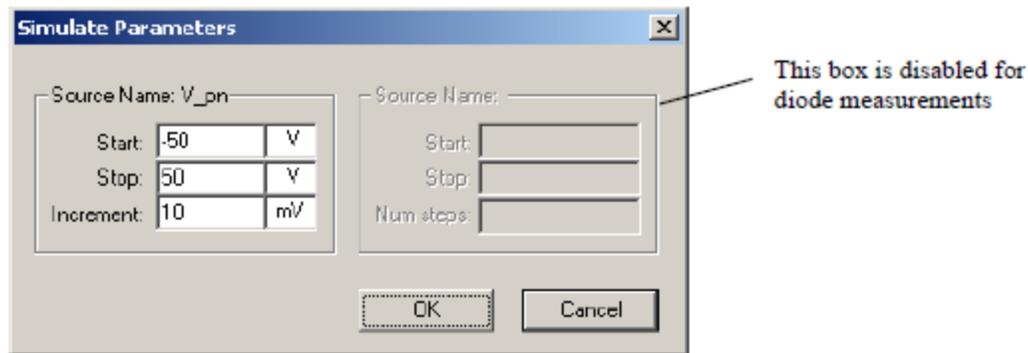
7. Opcionalmente, seleccione **View/Grapher** para ver los resultados de la simulación en el graficador.

#### 4.3.2.2.1 Cuadro de diálogo Simulate Parameters.

El cuadro de diálogo **Simulate Parameters**, que se describe en el paso 4 anterior, cambia dependiendo del dispositivo seleccionado en la lista desplegable de **Componentes**. Esta sección describe los datos que aparecen en el cuadro de diálogo cuando se seleccionan otros tipos de componentes.

#### 4.3.2.2.2 Parámetros de diodos.

Cuando haya seleccionado Diodo en la lista desplegable Componentes del cuadro de diálogo del **Analizador IV** haber hecho clic en **Sim\_Param.**, el cuadro de diálogo **Simulate Parameters** que aparece se rellena con los siguientes datos.

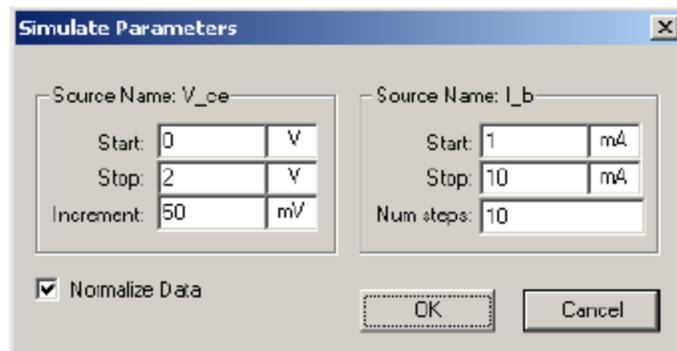


Opcionalmente, cambie la configuración predeterminada que aparece en los siguientes campos en el cuadro **Source Name: V<sub>pn</sub>**:

- **Start**-ingrese el V<sub>pn</sub> de inicio deseado para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha.
- **Parada**: introduzca el V<sub>pn</sub> de parada deseado para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha.
- **Incremento**: introduzca el tamaño deseado de los pasos de V<sub>pn</sub> para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha. Los puntos formados por estos pasos serán los puntos en los que se calcularán las mediciones para formar la curva en la gráfica.

#### 4.3.2.3 Parámetros del BJT PNP

Cuando haya seleccionado BJT PNP en la lista desplegable de **Componentes** del cuadro de diálogo del Analizador IV y haya hecho clic en **Sim\_Param.**, el cuadro de diálogo de **Simulate Parameters** que aparece se rellena con los siguientes datos.



Opcionalmente, cambie los parámetros de configuración predeterminados para V<sub>ce</sub> (voltaje colector-emisor) que aparecen en los siguientes campos en el cuadro **Source Name: V<sub>ce</sub>**:

- **Iniciar**-ingrese el V<sub>ce</sub> de inicio deseado para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha.
- **Parar**-ingrese el V<sub>ce</sub> parada deseada para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha.

- **Incremento:** introduzca el tamaño deseado de los pasos de Vce para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha. Los puntos formados por estos pasos serán los puntos en los que se calcularán las mediciones para formar la (s) curva (s) en la gráfica.

Opcionalmente, cambie los parámetros por defecto para Ib (corriente base) que aparecen en los siguientes campos en el cuadro **Source Name: I\_b**:

- **Start**-ingrese la Ib de inicio deseado para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha.

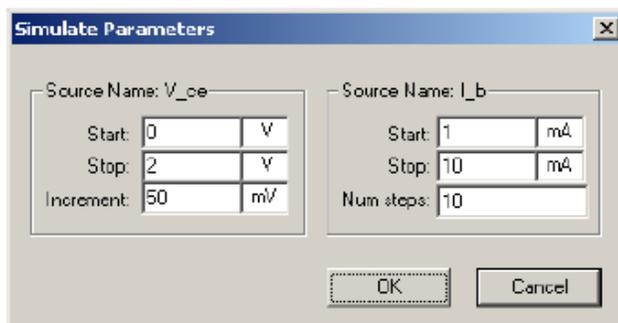
- **Parada:** introduzca la Ib de parada deseada para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha.

- **Num de pasos:** ingrese el número deseado de pasos para Ib. Habrá una curva para cada valor de Ib.

- Casilla de verificación **Normalizar datos:** muestra los valores Vce sobre las curvas (eje x) con valores positivos.

#### Parámetros del BJT NPN

Cuando haya seleccionado BJT NPN en la lista desplegable **Componentes** del cuadro de diálogo del Analizador IV y haya hecho clic en **Sim\_Param.**, el cuadro de diálogo **Simulate Parameters** que aparece es llenado con los siguientes datos.



Opcionalmente, cambie los parámetros de configuración predeterminados para Vce (voltaje colector-emisor) que aparecen en los siguientes campos en el cuadro **Source Name: V<sub>ce</sub>**:

- **Iniciar**-ingrese el Vce de inicio deseado para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha

- **Parar**-ingrese el Vce de parada deseada para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha.

- **Incremento:** introduzca el tamaño deseado de los pasos de Vce para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha. Los puntos formados por estos pasos serán los puntos en los que se calcularán las mediciones para formar la (s) curva (s) en la gráfica.

Opcionalmente, cambie los parámetros por defecto para Ib (corriente base) que aparecen en los siguientes campos en el cuadro de **Source Name: Ib**:

- **Start**-ingrese la Ib de inicio deseada para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha.

- **Parada:** introduzca la Ib de parada deseada para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha

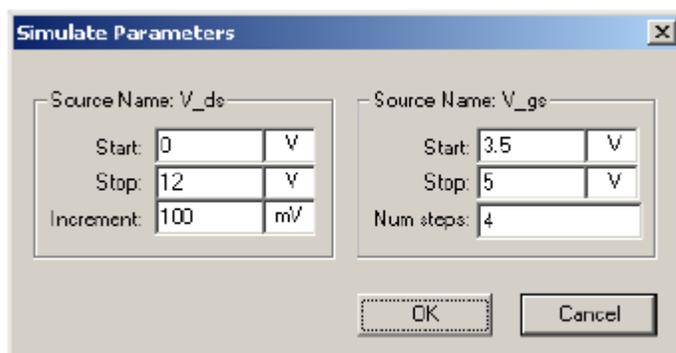
- **Num pasos:** ingrese el número deseado de pasos para Ib. Habrá una curva para cada valor de Ib.

#### 4.3.2.2.4 Parámetros del FET PMOS

Consulte el paso 4 en la página 8-57<sup>8</sup> para obtener detalles sobre el cuadro de diálogo **Simulate Parameter** cuando se usa con FET PMOS.

#### 4.3.2.2.5 Parámetros FET NMOS

Cuando haya seleccionado NMOS en la lista desplegable **Componentes** del cuadro de diálogo del Analizador IV y haber hecho clic en **Sim\_Param.**, el cuadro de diálogo **Simulate Parameters** que aparece se rellena con los siguientes datos.



Opcionalmente, cambie los parámetros predeterminados para Vds (voltaje de drenaje-fuente) que aparecen en los siguientes campos en el cuadro de **Source Name: V\_ds**:

- **Start**-ingrese el Vds de inicio deseado para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha.

- **Parar**-ingrese el Vds de parada deseada para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha.

- **Incremento:** introduzca el tamaño deseado de los pasos de Vds para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha. Los puntos formados por estos pasos serán los puntos en los que se calcularán las mediciones para formar la (s) curva (s) en la gráfica.

Opcionalmente, cambie los parámetros por defecto para Vgs (voltaje compuerta-fuente) que aparecen en los siguientes campos en el cuadro de **Source Name: V\_gs**:

- **Start**-ingrese el Vgs de inicio deseado para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha.

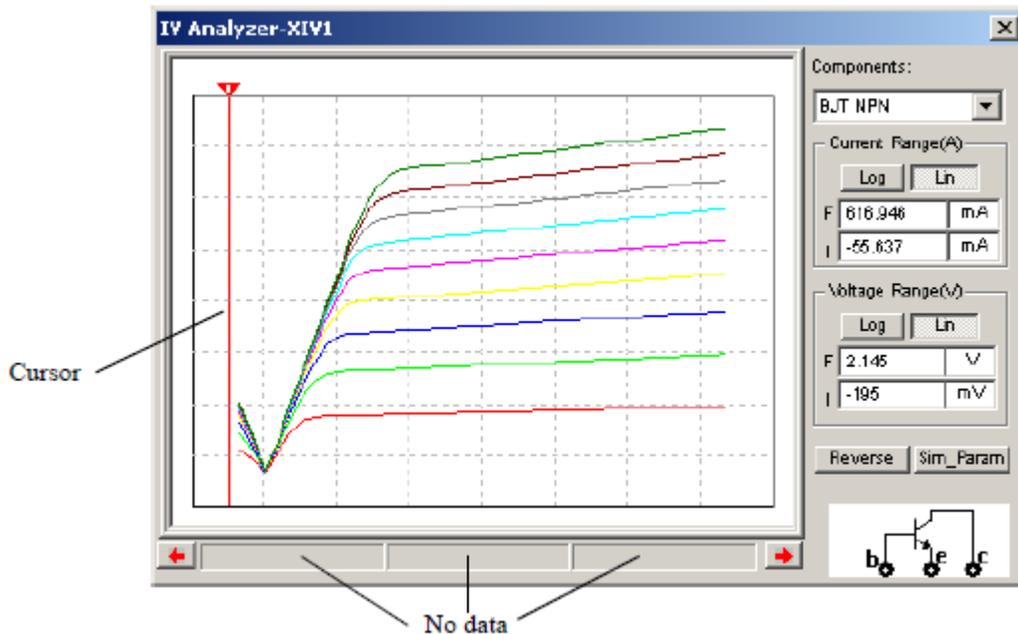
- **Parar**-ingrese el Vgs de parada deseada para el barrido en la sección izquierda y la unidad de medida en la sección derecha.

<sup>8</sup> Multisim™ User Guide. 2007. National Instruments Corporation. Electronics Workbench Group.

- **Num de pasos:** ingrese el número deseado de pasos de  $V_{gs}$  para el barrido. Los puntos formados por estos pasos serán los puntos en que las mediciones serán calculadas para formar la curva (s) en la gráfica.

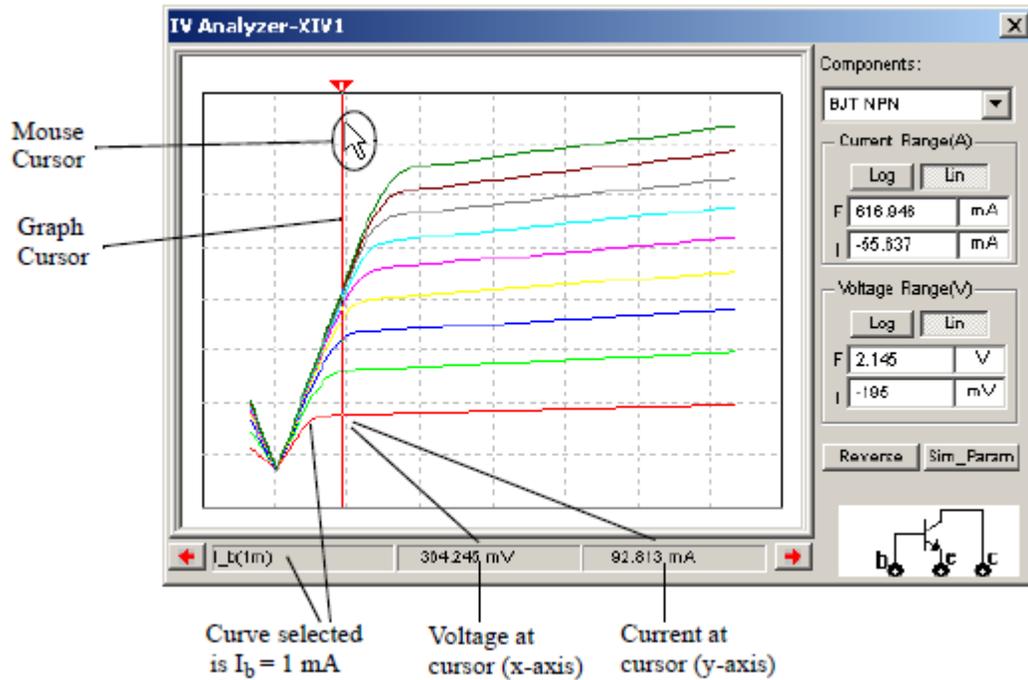
#### 4.3.2.2.6 Revisión de Datos del Analizador I-V.

Después de ejecutar un análisis I-V, tendrá una gráfica similar al siguiente. Tenga en cuenta que el cursor no está en ninguna de las curvas y los tres campos en la parte inferior del gráfico están vacíos.

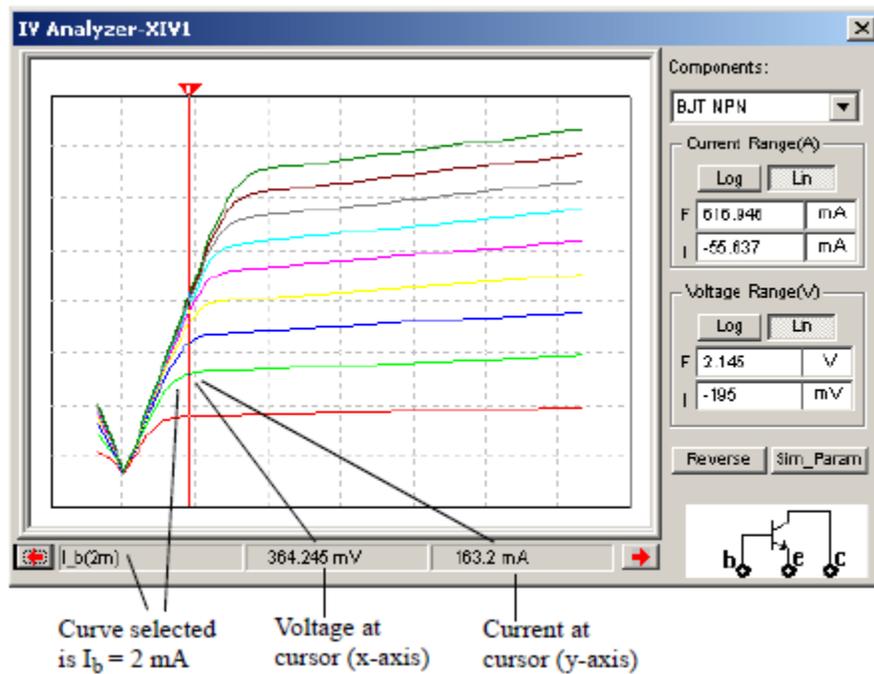


Nota: Esta sección utiliza datos del análisis de un NPN BJT.

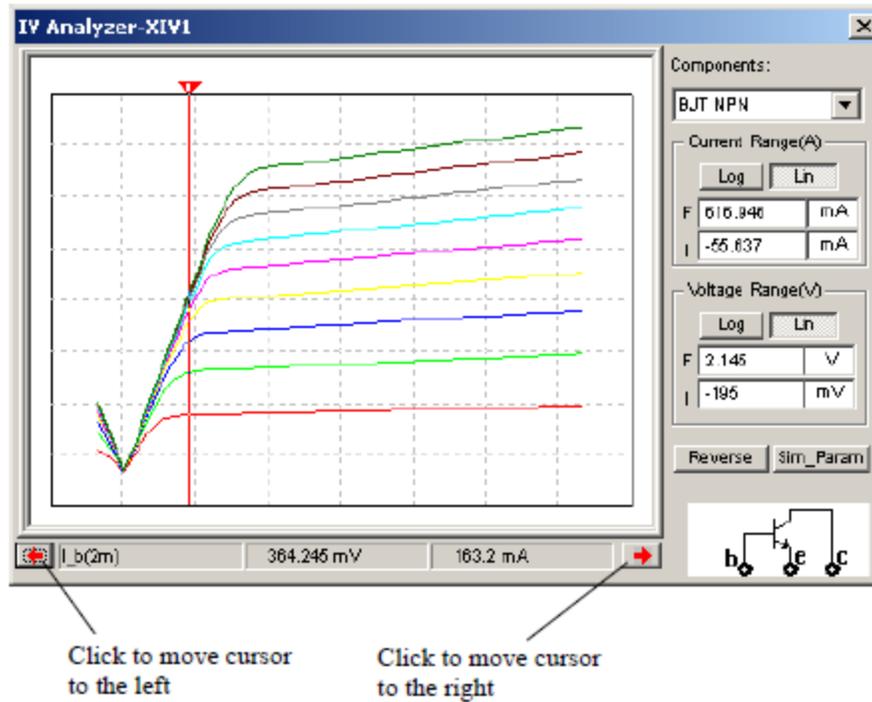
- Para ver los datos en el cuadro de diálogo del Analizador IV:
  1. Sitúe el cursor del ratón sobre el cursor de la gráfica y arrastre el cursor de la gráfica hasta un punto sobre las curvas. Los tres campos en la parte inferior de la gráfica ahora contienen datos que corresponden a una corriente de base ( $I_b$ ) de 1 mA.  $I_b$  (1m) está representado por la curva en la parte inferior de la gráfica.



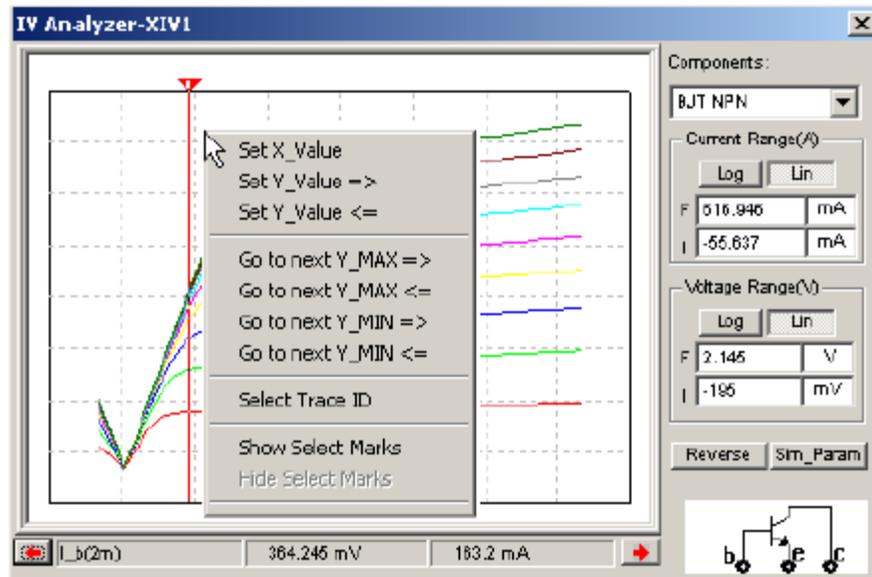
2. Para seleccionar otra curva, por ejemplo,  $I_b = 2 \text{ mA}$ , haga clic en esa curva con el cursor del ratón. Los campos en la parte inferior de la gráfica ahora contienen los datos del punto donde el cursor de la gráfica cruza la curva seleccionada.



3. También puede usar las flechas izquierda y derecha para mover el cursor de la gráfica, como se indica a continuación.

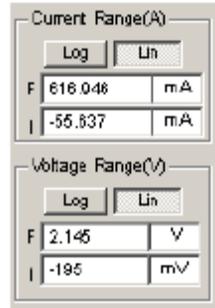


4. También puede mover el cursor de la gráfica a un valor x o y específico sobre la curva seleccionada haciendo clic con el botón derecho en él para mostrar un menú emergente.



Nota: Para obtener más información, consulte "9.2.2.3 Menú emergente del cursor" en la página 9-10.

5. Para ver áreas específicas de la gráfica, cambie los datos en los cuadros **Current Range(A)** y **Voltage Range(V)**.



- **Rango de corriente (A) (eje y)**

Campo **I** -ingrese la corriente inicial que se mostrará en la gráfica en el campo izquierdo y la unidad de medida en el campo derecho.

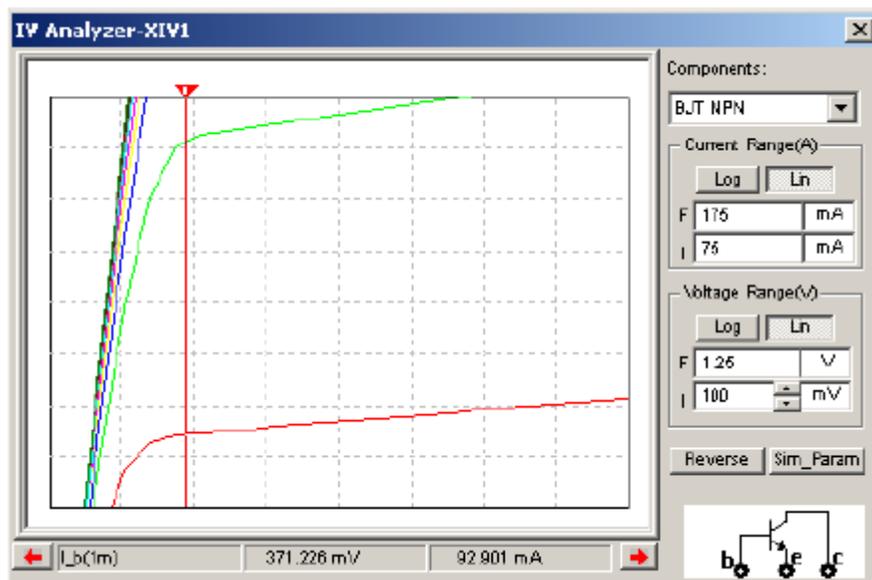
Campo **F**: introduzca la corriente final que se mostrará en la gráfica en el campo izquierdo y la unidad de medida en el campo derecho.

- **Rango de voltaje (V) (eje x)**

Campo **I** -ingrese el voltaje inicial que se mostrará en la gráfica en el campo izquierdo y la unidad de medida en el campo derecho.

Campo **F** -introducir el voltaje final que se mostrará en la gráfica en el campo izquierdo y la unidad de medida en el campo derecho.

6. En el ejemplo siguiente, la gráfica se ajusta para mostrar  $I_b = 2 \text{ mA}$ , de 75 mA a 175 mA en el eje y; y de 100 mV a 1.25 V en el eje x.



### 4.3.3 El luxómetro.

#### 4.3.3.1 Conceptos básicos de iluminación

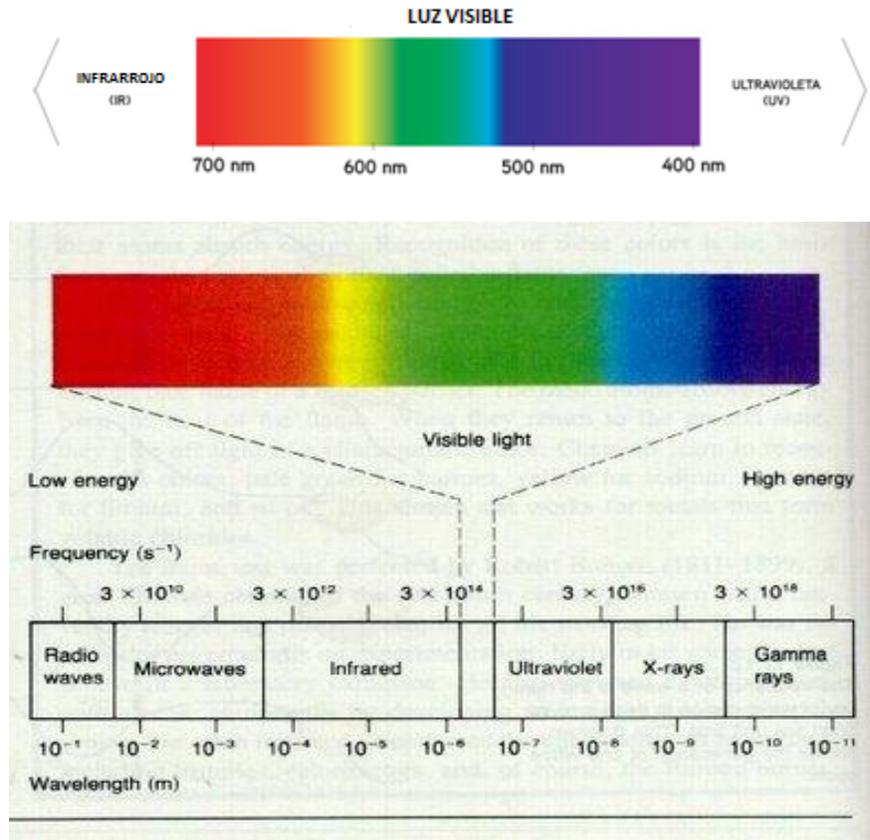
A continuación se describen de manera general, algunos conceptos que se deben tener en cuenta relacionados con la luminotécnica:

La luz tiene una doble naturaleza: corpuscular y ondulatoria, y en cada fenómeno concreto se manifiesta como onda o como corpúsculo. El rango completo de todas las ondas electromagnéticas constituye el espectro electromagnético ordenado de acuerdo con su frecuencia, longitud de onda en el vacío o energía del fotón. Se puede efectuar una clasificación según su principal fuente.

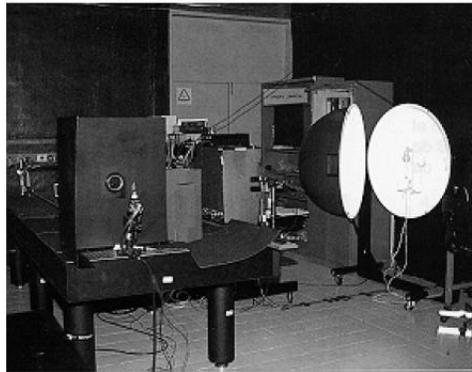
La definición clásica de la luz visible establece que es una radiación por medio de campos eléctricos y magnéticos, que se propagan a través del espacio en forma de ondas portadoras de energía. El ojo humano las percibe como claridad. En otras palabras, es la parte del espectro que podemos ver. Se trata de una radiación entre 380 y 770 nm, o sea, es una parte mínima del espectro total.

El estudio de la luz se realiza desde dos perspectivas: una, dentro del marco de la óptica física se ocupa del estudio de la propagación de la luz considerada una onda y otra, en el marco de la óptica geométrica, que considera a la propagación de la luz como rectilínea (el rayo luminoso caracteriza la luz y nos indica su dirección de propagación) en medios homogéneos e isotrópicos.

El estudio de la propagación de la luz pero dentro de la óptica geométrica, que se prescinde de la naturaleza ondulatoria de la luz y se utiliza la *aproximación de rayos* permite explicar los fenómenos de reflexión, refracción y propagación rectilínea de la luz.



Unidades de fotometría del Sistema Internacional				
Magnitud	Símbolo	Unidad	Abrev.	Notas
Intensidad luminosa	$I_v$	candela (= lm/sr)	cd	Es una <u>unidad básica del Sistema Internacional</u> .
Flujo luminoso	$F$	lumen (= cd·sr)	lm	Medida de la potencia luminosa percibida.
Luminancia	$L_v$	candela por metro cuadrado	cd/m <sup>2</sup>	A veces se usa la denominación <u>nit</u> , ajena al Sistema Internacional.
Iluminancia	$E_v$	lux (= lm/m <sup>2</sup> )	lx	Usado para medir la incidencia de la luz sobre una superficie.
Eficacia luminosa	$\eta$	lumen por vatio	lm/W	Razón entre <u>flujo luminoso</u> y <u>flujo radiante</u> .



Laboratorio de fotometría del CENAM, donde se realiza y se mantienen en operación los Patrones Nacionales de Intensidad Luminosa.

#### 4.3.3.1.1 Intensidad luminosa.



Se define como la cantidad de energía luminosa, proveniente de una fuente en una dirección dada, que atraviesa o incide sobre una superficie por unidad de ángulo sólido (o sobre una superficie esférica).

Su unidad es la **candela (cd)**. La candela (cd) se define como la intensidad luminosa o luminosidad, en una dirección dada de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  Hz y cuya intensidad energética en esa dirección es de 1/683 watt por esterradián (16ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1979).

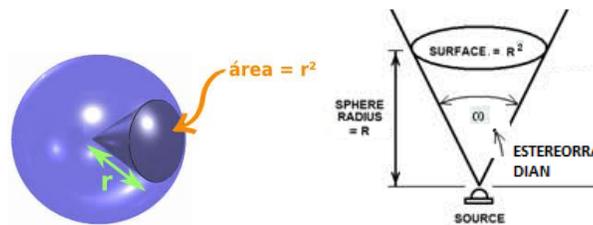


Una candela es una cantidad de luz que se puede interpretar como la luminosidad que da una vela.

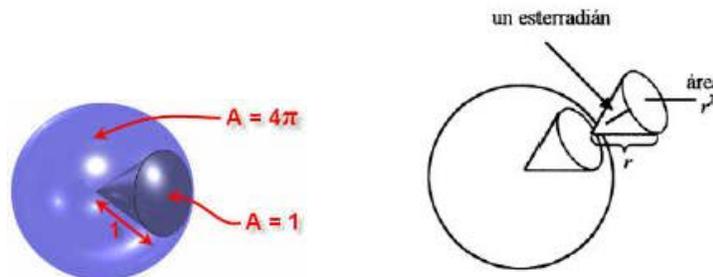
#### 4.3.3.1.2 Definición de esterradián.

Para mayor comprensión de la definición de la unidad de intensidad luminosa, que es una magnitud fundamental en el sistema métrico S.I., la candela, es necesario utilizar el concepto de estereorradián.

Un estereorradián "marca" un área en la superficie de una esfera igual a  $(\text{radio})^2$ .



Como lo que se está midiendo es ángulos, no importa el tamaño de la esfera, el ángulo SÓLIDO de la esfera completa siempre mide  $4\pi$  estereorradianes.



**El esterradian es la unidad del ángulo solido.**

Ejemplo: una esfera de radio 1 (llamada una "esfera unidad"):

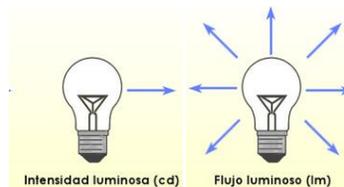
- tiene una superficie de  $4\pi$ ,
- un estereorradián "cubriría" un área de 1.
- Total de estereorradianes =  $\frac{4\pi}{1} = 4\pi$

Lámpara reflectora de 40W ( centro del haz )	450 cd
Lámpara reflectora de 150W	2500 cd
Lámpara PAR 38 spot 120W	9500 cd
Lámpara dicroica 12V/50W/10°	16000 cd
Lámpara PAR 56 spot 300W	40000 cd
Lámpara halógena Super Spot 12V/50W/ 4°	50000 cd
Proyector spot NEMA 1 mercurio halogenado 2000W	170000 cd

#### Ejemplos de fuentes luminosas

#### 4.3.3.1.3 Flujo luminoso, $\Phi$ .

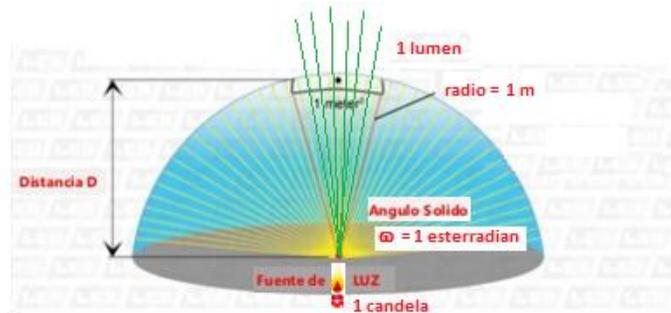
Mientras que la candela es una unidad de energía, tienen un equivalente conocido como flujo luminoso, medido en lumen ( $\text{cd} \cdot \text{sr}$ ), que mide la misma luz pero en términos de percepción del ojo humano.



Visualización de dos conceptos muy cercanos: intensidad luminosa y flujo luminoso

#### 4.3.3.1.4 El flujo luminoso como la cantidad de líneas de luz (rayos) que incide sobre una superficie.

Si se tiene una fuente luminosa de 1 candela, entonces flujo luminoso que atraviesa la superficie comprendida por 1 estereoradian es 1 lumen ( $1 \text{ cd} \cdot 1 \text{ sr}$ ).



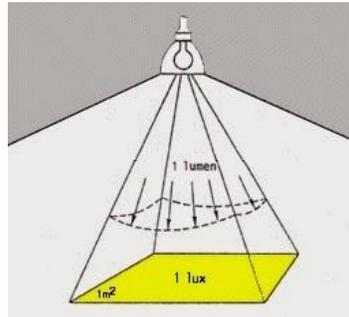
Un lumen es equivalente a la luz producida por una vela en una dirección que abarque un esterradian.

Lámpara incandescente para la señalización	1 Lm
Lámpara para bicicleta	18 Lm
Lámpara incandescente clara de 40 W	430 Lm
Tubo fluorescente de 36 W	3000 Lm
Lámpara a vapor de mercurio de 400 W	22000 Lm
Lámpara a vapor de sodio de alta presión 400 W	47000 Lm
Lámpara a vapor de mercurio halogenado de 2000 W	170000 Lm

#### Ejemplos de fuentes medidas en lumen

#### 4.3.3.1.5 Iluminación o iluminancia:

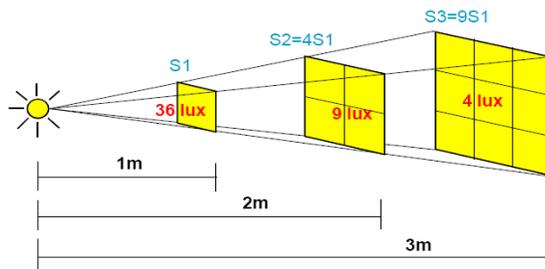
Flujo luminoso que incide sobre una superficie. Su unidad es el lux. Un lux tiene en cuenta la superficie del área donde la luz es dispersada, lo cual afecta a cómo de luminoso aparece. Un lux se iguala a un lumen de luz esparcido por una superficie de un metro cuadrado.



- 1 Lux = 1 lumen x metro cuadrado.
- 1 Lux = 0.093 pie-candela (ft-cd).
- 1 Pie - Candela = 10.8 Lux

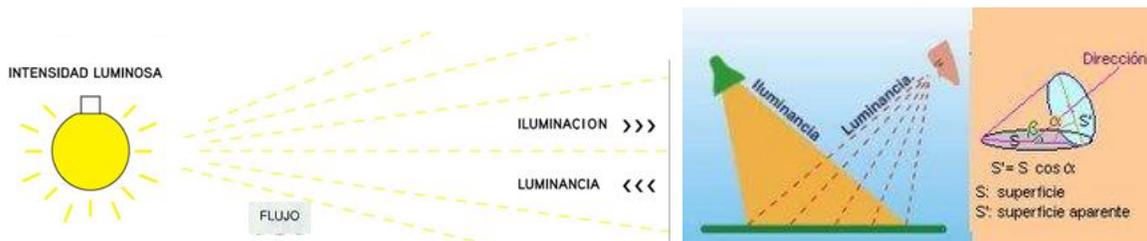
#### 4.3.3.1.6 Ley inversa de los cuadrados.

La iluminancia sigue la ley de los cuadrados: La iluminación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia existente entre la fuente de luz y la superficie iluminada



$$\text{Iluminancia} = \frac{\text{Intensidad}}{(\text{Distancia})^2}$$

#### 4.3.3.1.7 Luminancia:



(Símbolo: L, unidad de medida: cd/m<sup>2</sup>). Indica la cantidad de flujo luminoso que el ojo percibe de una superficie luminosa o iluminada. Su equivalente psicológico es el brillo o la brillantez, y es una magnitud empleada en exteriores para la planificación del alumbrado.

Otras formas de describir la luminancia:

- También se considera como la cantidad de luz que incide en una superficie y que es reflejada. Esta propiedad permite que los objetos sean visibles al ojo, debido a las transformaciones por absorción de los mismos, proporcionando una percepción de brillo. También se le llama luminancia al brillo de monitores y exhibidores de pantalla.
- Es la sensación de claridad que la misma produce en los ojos y que se transmite al cerebro. Si observamos desde cualquier parte una superficie iluminada, la intensidad luminosa producida o reflejada por una superficie dividida por el área visible para los ojos se denomina luminancia.

La unidad básica de la luminancia o brillo es el pie-lambert.

$$1 \text{ pie-lambert} = 3.43 \frac{\text{candelas}}{(\text{metro})^2}$$

Calle bien iluminada	2 cd/m <sup>2</sup>
Papel blanco iluminado con 400 lux	100 cd/m <sup>2</sup>
Papel blanco iluminado con 1000 lux	250 cd/m <sup>2</sup>
Papel negro iluminado con 400 lux	15 cd/m <sup>2</sup>
Luminancia ideal para las paredes de oficina	50 a 100 cd/m <sup>2</sup>
Luminancia ideal para el cielorraso de oficinas	100 a 300 cd/m <sup>2</sup>
Máxima luminancia admitida para pantallas de video	200 cd/m <sup>2</sup>

#### Ejemplos

#### 4.3.3.1.8 Rendimiento luminoso.

Mide la cantidad de energía que se transforma en luz en relación con la energía total consumida. Su unidad es el lumen por watts (lm/w).



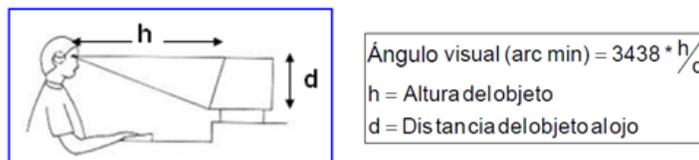
Fuente	Potencia aproximada en Watt (W)	Luminosidad aproximada en candelas (cd)	

<u>vela, bujía o candela de cera</u>	no notoria	1 cd	
<u>Led poco luminoso</u>	decenas de miliwatt (mW)	decenas de <u>milicandelas</u> (mcd)	
<u>Lámpara incandescente</u>	40 W	40 cd	
<u>Lámpara incandescente</u>	100 W	130 cd	
<u>Lámpara fluorescente</u>	40 W	200 cd	

#### 4.3.3.1.9 Visibilidad.

Definida como la claridad con la que los seres humanos pueden ver. Sus factores críticos son:

- **Angulo Visual:** Es el ángulo subtendido al nivel de los ojos por el objeto. Este se define en arco minutos (1/60 grados), para objetos pequeños como:



**Angulo visual**

- **Contraste:** Se define como la diferencia en luminancia entre el objeto observado y el fondo.

$$\text{Contraste} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max}}$$

L= Luminancia

Es decir, el contraste se relaciona con la diferencia entre las luminancias máximas y mínimas del objeto y el fondo.

#### 4.3.3.1.10 Características de la visión humana

La visión humana puede clasificarse básicamente en tres tipos:

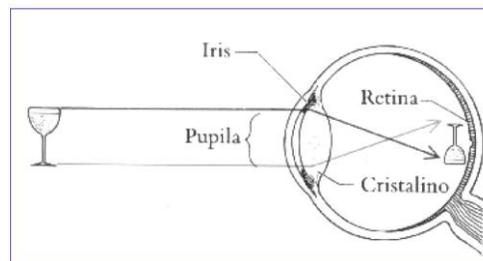
- **Visión Fotópica (Diurna):** Permite la percepción de luz y color. En este tipo de visión la máxima sensibilidad se produce para las longitudes de onda alrededor de los 555 nm, la cual corresponde al color amarillo - limón.
- **Visión Escotópica (Nocturna):** Permite la percepción de las diferencias de luminosidad pero no de los colores, ya que en niveles de luz bajos los mecanismos de percepción de color del ojo humano (conos de la retina), permanecen inactivos.
- **Visión Mesotópica (Intermedia):** Conocida como de “Compromiso”. Es la que se encuentra entre las dos anteriores.

Los anteriores aspectos, toman importancia al diseñar sistemas de iluminación, sobre todo en trabajos o áreas de trabajo muy especiales (señalización marítima, aérea, trabajos con material fotosensible).

#### 4.3.3.1.11 Percepción visual

La percepción visual tiene lugar cuando: (Ver Figura No. 3)

1. El objeto físico emite o refleja radiaciones luminosas.
2. Las radiaciones luminosas penetran el globo ocular a través de la pupila, que es controlada por el iris. Hasta llegar a la retina.
3. Luego las ondas luminosas son captadas por los conos y bastoncillos.
4. Los estímulos luminosos producen en la retina del observador una proyección óptica invertida del objeto. El tamaño de la proyección óptica varía según sea la distancia entre el objeto y el observador. La forma de la proyección óptica varía con el cambio de la inclinación del objeto respecto al observador.
5. La energía electromagnética que incide sobre los conos y bastoncillos es transformada en impulsos nerviosos que llegan hasta el nervio óptico.
6. Por último la información llega al cerebro en donde es interpretada.



**Percepción visual**

En la percepción visual intervienen varios aspectos como:

- **Acomodación Visual:** Es la capacidad que tiene el ojo (cristalino) de ajustarse automáticamente a las diferentes distancias de los objetos, obteniendo así una imagen nítida en la retina.
- **Adaptación Visual:** Proceso por el cual el ojo se adapta a diferentes niveles de luminosidad. Para ello la pupila adapta su tamaño al nivel de iluminación existente. La duración de adaptación a la luz depende de varios factores, pero lo más significativo es la adaptación de cambios de niveles bajos a niveles altos de iluminación, la cual se realiza en poco tiempo; al contrario, cuando se hace de niveles altos a niveles bajos toma mayor tiempo de adaptación.
- **Agudeza Visual:** Es la capacidad de percibir y discriminar visualmente los detalles más pequeños. Este factor disminuye significativamente con la edad (presbicia) y aumenta con la iluminación.

- **Campo Visual:** El campo visual del hombre está limitado a un ángulo de unos 180° en el plano horizontal y unos 130° en el plano vertical, 60° por encima del plano que pasa por los ojos y 70° por debajo de dicho plano.
- **Brillo:** Constituye un factor de visibilidad y depende de la intensidad de luz que recibe y de la proporción de luz que es reflejada.
- **Contraste:** Permite disminuir el esfuerzo visual. Se puede aumentar con la iluminación.
- **Tiempo:** El proceso visual requiere de tiempo, de forma que el ojo pueda ver pequeños detalles, incluso con bajos niveles de iluminación si se le da tiempo suficiente. El aumento de luz facilita una rápida visión.

#### 4.3.3.2 Funcionamiento del luxómetro

Un luxómetro es un dispositivo para medir la iluminancia [en lux y en foot-candle (pie-candela)]. Mide específicamente la intensidad con que la luminosidad afecta al ojo humano. Su manejo es muy sencillo, lo que permite que el luxómetro sea usado por personal no especializado en mediciones. Sin embargo, siempre es conveniente que al momento de medir la luz tener en cuenta ciertas condiciones previas para obtener resultados con una reproducibilidad alta.

Funciona usando arreglos de fotodiodos. Un circuito integrado recibe cierta cantidad de luz (la energía de los fotones) que convierte luz en una corriente eléctrica. Medir esta corriente permite al dispositivo determinar el valor de la medida en lux. Esta señal se puede mostrar por el desplazamiento de una aguja, el encendido de diodo o el despliegue de dígitos en una pantalla en el luxómetro.

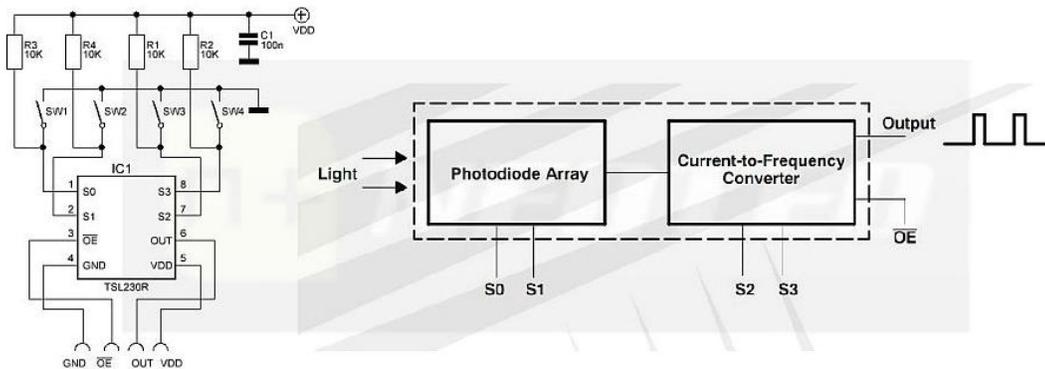


Luxómetro analógico

Luxómetro digital

Una de las propiedades importantes que debe tener el mencionado instrumento es que sea sensible a **todas las longitudes de onda por igual**. El ojo humano es más sensible a los 550nm (color verde) por lo tanto, nuestra visión no sería un buen elemento para definir si existe mayor luminosidad en un determinado espacio. Es decir, puede existir una **fuentes luminosa** muy importante y hasta *peligrosa* sin que nos percatemos de ello.

Un C.I. muy utilizado para implementar el sensor de un luxómetro es el **TSL230R**, un dispositivo que **convierte la cantidad de luz recibida en una frecuencia "proporcional"** y que constituye la plataforma de cualquier instrumento de medición de iluminación.



Los convertidores de luz a frecuencia programables **TSL230R** combinan un fotodiodo de silicio configurable y un convertidor de corriente a frecuencia en un solo circuito integrado CMOS monolítico. La salida puede ser un tren de pulsos o una onda cuadrada (ciclo de trabajo del 50%) con frecuencia directamente proporcional a la intensidad de la luz. La sensibilidad del dispositivo se puede seleccionar en tres rangos, proporcionando dos décadas de ajuste. La frecuencia de salida a escala completa puede ser escalada por uno de los cuatro valores preestablecidos. Todas las entradas y la salida son compatibles TTL, permitiendo la comunicación bidireccional directa con un microcontrolador para programación e interfaz de salida. Se proporciona una habilitación de salida (OE) que coloca la salida en el estado de alta impedancia para unidades múltiples compartiendo una línea de entrada del microcontrolador.

El luxómetro se utiliza para la medición de luz en la industria, la agricultura y la investigación. También se utiliza el luxómetro para determinar la iluminación en sitios de trabajo, en escaparates y por parte de diseñadores. El uso más común de un luxómetro es la fotografía y en ambientes cinematográficos para obtener la mejor calidad en una fotografía o filmar escenas con diferentes niveles de luz.

Otro uso común de un luxómetro es para situaciones donde se debe cumplir ciertas regulaciones de salud y seguridad. Se puede utilizar para verificar si una habitación o sala tienen la luminosidad adecuada para que unos trabajadores realicen su labor sin dañarse la vista. El uso de un luxómetro tiene en cuenta el tamaño de la habitación. Lo hace de tal forma que simplemente medir la intensidad de la luz en lumen no daría el mismo resultado.

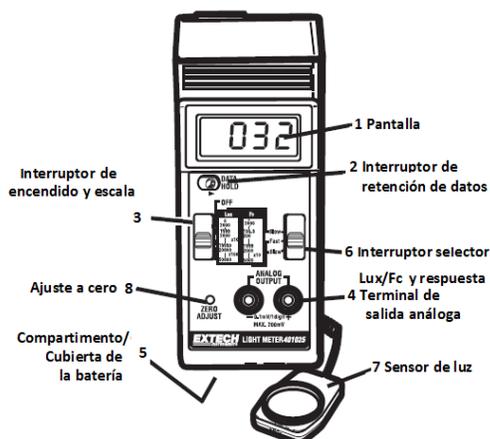
Los luxómetros pueden tener varias escalas para adaptarse a las luminosidades débiles o las fuertes (hasta varias decenas de millares de luxes). A continuación se describirán algunos ejemplos de luxómetros sencillos y de fácil manejo.

#### 4.3.3.3 El luxómetro Extech 401025

##### 4.3.3.3.1 Características importantes:

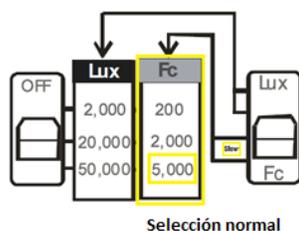
- Posee sensor foto diodo
- Posee filtro de corrección de color.
- Mide en Lux y Foot-Candels (Fc).
- Selector de respuesta Lenta y Rápida

#### 4.3.3.2 Descripción del Panel Frontal

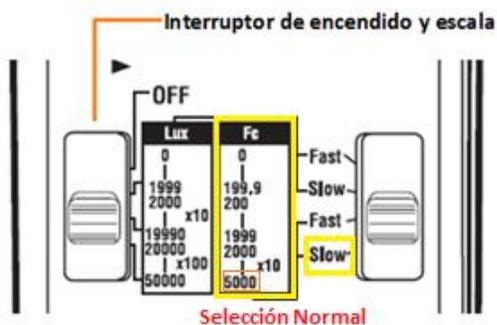


#### 4.3.3.3 Operación.

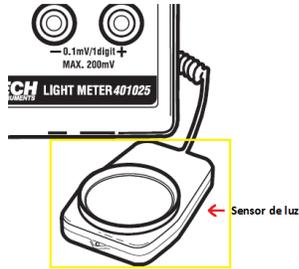
1. Seleccione en qué unidades desea el resultado (Lux o Foot candle) y el tiempo de respuesta (Rápido o lento) en el interruptor deslizante. La selección normal es Fc y Lento (*Slow*).



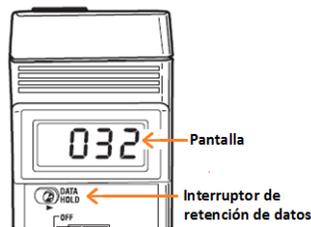
2. Seleccione la escala máxima en el interruptor «Range Switch».



3. Sostenga el sensor de luz «Light Sensor» de manera que quede frente a la fuente de luz que desea medir. La pantalla indicará directamente los valores de luz.



4. Para «retener» una medición, deslice el interruptor de retención de datos «Data Hold» a la posición «hold». La lectura se «congelará» en pantalla hasta que suelte el interruptor de retención de datos «Data Hold».



Nota 1: La indicación de “Sobre Escala” es una indicación de "I". Si esto ocurre, cambie a una escala más alta.

Nota 2: Para mediciones en la escala de Fc 5000, la lectura indicada debe ser multiplicada por 10.

Nota 3: Para mediciones realizadas en la escala de 20000 ó 50000 Lux, la lectura indicada debe ser multiplicada por 10 y 100 respectivamente.

Multiplicadores de escala del indicador		
Escala	Unidades	Multiplicador
200	Fc	Lectura directa
2000	Fc y Lux	Lectura directa
5000	Fc	Lecturas x10
20,000	Lux	Lecturas x10
50,000	Lux	Lecturas x100

Nota 4: El medidor indicará valores sobre las escalas máximas. No se conoce la precisión de estas medidas.

**Ejemplo:** Si una medida en la escala de 5000 Fc indica 350, entonces el valor realmente medido es:

$$350 \times 10 = 3500 \text{ Fc.}$$

#### 4.3.3.4 Selección de Escala

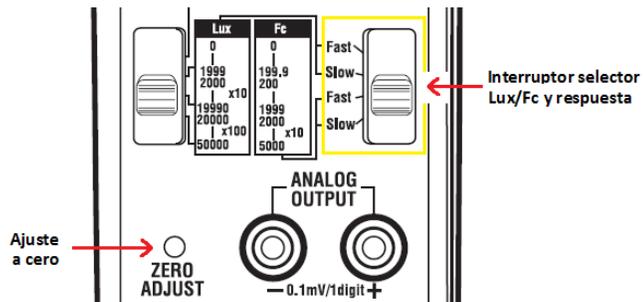
El medidor tiene tres escalas de medición (0-200, 0-2000, y 0-5000 Fc) o (0-2000, 0-20000, y 0-50000 Lux). La selección de la escala adecuada producirá la lectura más precisa. Seleccione siempre la escala que produzca la mayor cantidad de dígitos sin exceder la cuenta máxima para esa escala en particular. Por ejemplo, una lectura de 1456 Fc deberá leerse en la escala de 0-2000, no en la escala 0-5000.

#### 4.3.3.5 Procedimiento a cero

El cero del medidor (indicador sin entrada de luz) puede cambiar con el tiempo. Puede requerirse revisión y ajuste periódico.

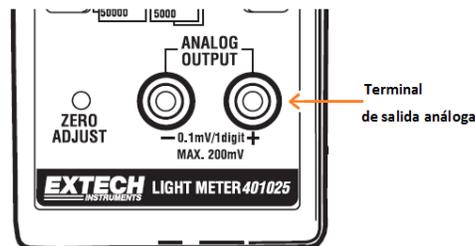
1. Cubra completamente el sensor para bloquear cualquier luz.
2. Fije el selector en la menor escala Lux o Fc

3. Use un destornillador pequeño, ajuste el control “Zero” para una indicación de cero. Los últimos dígitos pueden cambiar ligeramente. Esto es normal y no afecta la precisión del medidor.



#### 4.3.3.3.6 Salida analógica

Los conectores de la salida analógica en el panel frontal producen una señal de 0.1mV CD por dígito de señal que puede ser empleado con el propósito de registros o grabación.



#### 4.3.3.4 Luxómetro con función de conexión a una computadora.

El Luxómetro Digital HD400 puede ser conectado a una PC a través de su interfaz USB. Con el medidor se incluye un cable USB y software. El software permite al usuario ver, guardar, e imprimir lecturas.



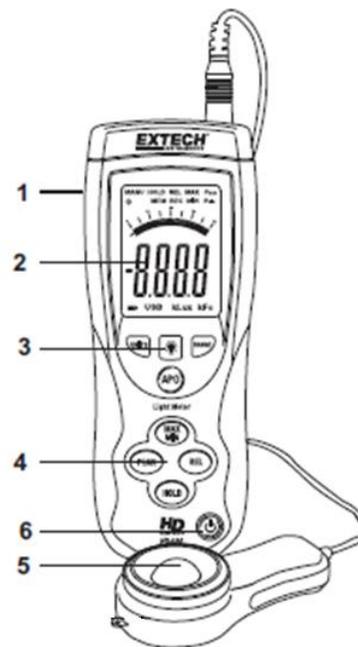
#### 4.3.3.4.1 Características

- Precisión para la medición de la iluminancia de luz.
- Pantalla LCD grande de 4000 cuentas con retroiluminación y gráfica de barras de 40 segmentos.
- Función de retención de datos.
- Con respuesta fotópica.
- Sensor foto diodo estable de larga duración con filtro de respuesta al espectro.
- Respuesta rápida.

- Alta precisión.
- Función cero automática.
- Apagado automático después de 20 minutos de inactividad.
- Memoria máxima y mínima de nivel de luz.
- Conexión USB a PC para captura de datos.
- Cuatro (4) niveles de escala.

#### 4.3.3.4.2 Descripción del medidor

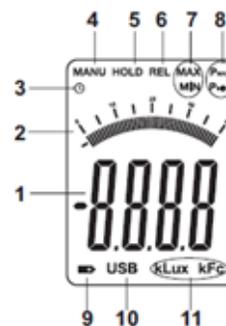
1. Conexión USB para PC (bajo la tapa plegadiza)
2. Pantalla LCD
3. Juego superior de botones pulsadores
4. Juego inferior de botones pulsadores
5. sensor (Cubierta protectora no se muestra)
6. Botón de encendido y apagado



NOTA: El compartimiento de la batería, montaje en trípode y soporte inclinado se encuentran atrás del instrumento y no están ilustrados.

#### 4.3.3.4.3 Descripción de la pantalla

1. Lectura de medición digital
2. Gráfica de barras (lectura de medidas)
3. Icono de estado del apagado automático
4. Icono MANU
5. Icono RETENCIÓN DE DATOS
6. Icono modo RELATIVO
7. Modo de lectura para MAXIMOS y MÍNIMOS
8. Modo de RETENCIÓN DE PICOS
9. Indicador de batería débil
10. Icono de conexión a PC
11. Escala de unidades de medición.



#### **4.3.3.4.4 Operación**

##### **4.3.3.4.4.1 Unidad de medida**

Al presionar el botón UNITS (unidades) se cambia la unidad de medida de Lux a Fc o de Fc a Lux.

##### **4.3.3.4.4.2 Selección de escala**

Al presionar botón RANGE se selecciona la escala de medición. Hay cuatro opciones (escala) para cada unidad de medida. Las unidades y la ubicación del punto decimal identifican la escala seleccionada.

##### **4.3.3.4.4.3 Toma de medidas**

1. Quite la tapa protectora del sensor.
2. Coloque el sensor en posición horizontal bajo la fuente de luz que desea medir.
3. Lea la medida de iluminancia en la pantalla LCD.
4. El medidor indicará 'OL' cuando la medida esté fuera de la escala especificada del medidor o si el medidor está ajustado en la escala equivocada. Verifique la escala, presione el botón de escala RANGE.
5. Reemplace la tapa protectora del sensor cuando el medidor no esté en uso.

##### **4.3.3.4.4.4 Retención de datos.**

Para congelar la lectura en la pantalla LCD, presione la tecla HOLD. 'MANU HOLD' aparecerá en la esquina superior izquierda de la LCD. Presione HOLD momentáneamente para regresar a operación normal ('MANU HOLD' se apagará).

##### **4.3.3.4.4.5 Retención de picos**

La función de retención de picos permite al medidor capturar destellos de luz de corta duración. El medidor puede capturar picos cortos de hasta 10  $\mu$ S de duración.

1. Presione el botón PEAK para activar la función de retención de picos. En la pantalla aparecerá 'MANU Pmax'. Presione el botón PEAK de nuevo y aparecerá 'MANU Pmin'. Use 'Pmax' para capturar picos positivos. Use 'Pmin' para capturar picos negativos.
2. Para salir del modo de retención de picos y regresar a modo de operación normal, presione el botón PEAK por tercera vez.

##### **4.3.3.4.4.6 Lectura máxima (MAX) y mínima (MIN) Memoria**

La función MAX-MIN permite al medidor guardar las lecturas más alta (MAX) y más baja (MIN).

1. Presione el botón MAX-MIN para activar esta función. En la parte superior de la pantalla aparecerá 'MANU MAX' y el medidor sólo indicará la lectura más alta encontrada.
2. Presione el botón MAX-MIN de nuevo. 'En la parte superior de la pantalla aparecerá 'MANU MIN' y el medidor sólo indicará la lectura más baja encontrada.
3. Para salir de este modo y regresar a modo de operación normal, presione el botón MAX-MIN por tercera vez.

##### **4.3.3.4.4.7 Modo relativo**

La función de modo relativo permite al usuario guardar un valor de referencia en el medidor y contra el cual luego comparar lecturas subsecuentes. Por ejemplo, si el usuario guarda una lectura de 100 Lux, todas las lecturas subsiguientes serán indicadas como la lectura actual menos 100.

1. Tome la medición, y cuando el valor de referencia deseado esté en pantalla, presione el botón REL.
2. En la parte superior de la pantalla LCD aparecerá 'MANU REL'.

3. Todas las lecturas subsiguientes serán compensadas por una cantidad igual al nivel de referencia. Por ejemplo, si el nivel de referencia es 100 Lux, todas las lecturas subsiguientes serán iguales a la lectura actual más 100 Lux.
4. Para salir del modo relativo, presione el botón REL. Se apagará 'MANU REL' para indicar que el medidor ha regresado a modo normal de operación.

#### 4.3.3.4.8 Retroiluminación LCD

El medidor está equipado con retroiluminación para iluminar la pantalla LCD.

1. Presione el botón retroiluminación  para encender la retroiluminación
2. Presione el botón retroiluminación de nuevo para apagar. Tenga en cuenta que la retroiluminación se apagará automáticamente después de un periodo breve con el fin de ahorrar energía de la batería.
3. La función de retroiluminación usa energía adicional de la batería. Para conservar energía, use la retroiluminación frugalmente.



#### 4.3.3.5 Conexión USB para PC

##### 4.3.3.5.1 Descripción

El medidor HD400 puede ser conectado a una PC a través de su interfaz USB. Con el medidor se incluye un cable USB y el software Windowstm. El software permite al usuario ver, guardar, exportar e imprimir lecturas de la PC.

Recuerde que el HD400 no registra los datos de las lecturas, lo que significa que no guarda las lecturas en una memoria interna; simplemente muestra las lecturas en la PC tal y como son tomadas en tiempo real; después de lo cual las lecturas pueden ser analizadas, guardadas como texto o impresas.

##### 4.3.3.5.2 Especificaciones de escala

Unidades	Escala
Lux	400.0
	4000
	40.00k
	400.0k
Bujias pie	40.00
	400.0
	4000
	40.00k

#### 4.3.4. Tacómetro.

Un tacómetro es un instrumento capaz de **medir la velocidad de giro de un eje**. A diferencia de los medidores e instrumentos vistos en este mismo tema, el tacómetro es un medidor muy frecuentemente utilizado en todo el mundo. Los tacómetros poseen la capacidad de medir la velocidad angular de giro de un motor, esta velocidad se mide en revoluciones por minuto (RPM), en vez de hertz.



Tacómetro de un automóvil

Un error que se comete a menudo es confundir los tacómetros con los velocímetros convencionales debido a que por medio de una conversión, este instrumento puede indicar a qué velocidad se desplaza un automóvil km/h.



##### 4.3.4.1 Diferencias entre un tacómetro analógico y un tacómetro digital:

Solo hay 2 diferencias destacables entre estas 2 clases de tacómetros, la primera y la más obvia es que los tacómetro analógicos poseen una aguja que rota sobre un eje, de esta manera puede presentar un resultado en base a una escala pre establecida. Un tacómetro digital reemplaza a aguja por una pantalla o display, en este se muestran los valores recopilados por el instrumento de medición

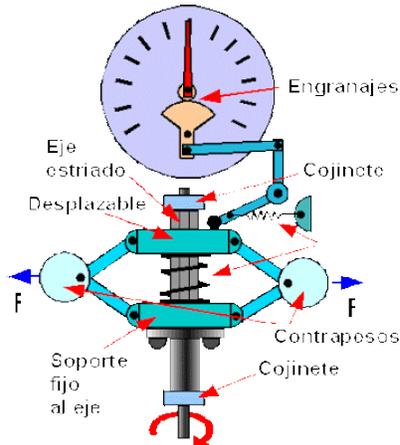


Tacómetro digital y analógico

Como segundo punto en cuanto a sus diferencias, se ha demostrado que los tacómetros digitales son mucho más eficientes y precisos que los tacómetros analógicos.

#### 4.3.4.2 Tacómetro centrífugo.

Este tipo está basado en el volante centrífugo clásico que fue empleado inicialmente en las calderas de vapor. Dos pesos rotatorios articulados a un eje giratorio aumentan su radio de giro debido a la fuerza centrífuga y comprimen un resorte. La medida de la compresión del resorte leída en una escala representa la velocidad de giro del eje.



La velocidad máxima o límite que pueden registrar estos instrumentos es de más de 4000 rpm con una precisión de 1% además pueden disponer de transmisión hidráulica o neumática.

#### 4.3.4.3 Los tacómetros eléctricos

Estos aparatos basan su funcionamiento en el crecimiento o disminución del voltaje o la frecuencia de la corriente producida por un generador de corriente alterna al que se le aplica la velocidad de rotación a medir.

Podemos entonces construir un tacómetro eléctrico si se acopla un pequeño generador de corriente alterna al eje en rotación cuya velocidad se quiere medir, y su señal de salida se conecta a un voltímetro o frecuencímetro cuya escala haya sido calibrada convenientemente en unidades de velocidad de rotación.

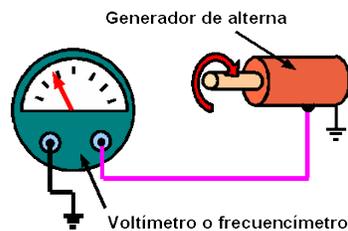


Figura 1.

#### 4.3.4.4 Tacómetro de corrientes Foucault

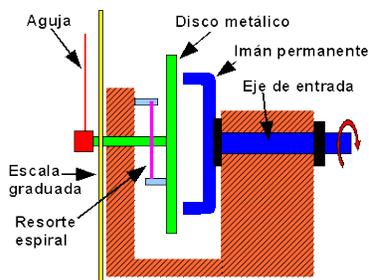


Figura 2.

Estos aparatos basan su funcionamiento en la fuerza de arrastre que recibe un disco conductor debido a las corrientes inducidas en él (corrientes de Foucault), cuando se encuentra muy cerca a un imán que gira.

El eje en movimiento está acoplado a un imán permanente en forma de U que gira muy próximo a un disco, generalmente de aluminio. La rotación del imán induce corriente eléctrica en el disco de aluminio. Se forman diminutas bobinas virtuales dentro de la masa del disco. Estas bobinas tienden a seguir al campo rotacional y se produce una tendencia a la rotación del disco. El disco no puede girar porque se lo impide un resorte en espiral acoplado a él por un extremo, no obstante el par generado vence parcialmente la fuerza del resorte y el disco gira cierto ángulo. Una aguja acoplada en el extremo del eje del disco indicará un valor en la escala.

La indicación de la aguja sobre la escala dependerá de la velocidad de rotación del eje de entrada, a más velocidad más valor indicado y a menos velocidad menor valor indicado, si se calibra la escala apropiadamente tendremos un tacómetro de inducción.

#### 4.3.4.5 Tacómetros por conteo de pulsos

Estos tacómetros, que pueden ser de contacto, o sin contacto con la pieza que gira. Basan su funcionamiento en el conteo de pulsos eléctricos por unidad de tiempo, generados por algún procedimiento, proporcionales a la velocidad de giro de la pieza, cuya velocidad se quiere medir.

En algunos casos, como en los automóviles, se utilizan directamente los pulsos generados por alguna de las partes de él, como el sistema de encendido, en otros, se acoplan al árbol al que se quiere medir la velocidad un dispositivo que los genera. De todas formas el sistema de medición de velocidad de giro se compone de dos partes generales:

- 1.- Un dispositivo generador de pulsos en cantidad proporcional al giro.
- 2.- Un contador de esos pulsos por unidad de tiempo, calibrado en velocidad de giro, generalmente revoluciones por minuto (RPM).

El dispositivo indicador final puede ser tanto digital como analógico de aguja indicadora.

Existen dos métodos principales que se usan para lograr los pulsos eléctricos necesarios para la medición, estos son:

- 1.- Generando pulsos por medios ópticos.
- 2.- Generando pulsos por inducción magnética.

#### 4.3.4.6 Generación por inducción magnética

En la figura 3 se muestra un esquema de cómo funciona este tipo de tacómetro.

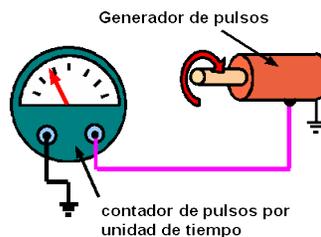


figura 3

Un pequeño generador de pulsos eléctricos de imanes permanentes, se acopla a la pieza cuya velocidad de rotación queremos medir, este generador puede producir uno más pulsos por cada vuelta de la pieza. La señal

de salida del generador se conecta a un dispositivo electrónico que cuanta los pulsos por unidad de tiempo, y muestra la indicación correspondiente a esta velocidad, en la escala o en una pantalla digital. En muchos casos la generación de los pulsos se realiza utilizando la propia pieza que gira, a la cual se le adjunta un pequeño imán que pasa muy cerca de una bobina estacionaria. Cada vez que el imán pasa frente a la bobina, en ella se genera un voltaje instantáneo que constituye el pulso.

#### 4.3.4.7 Generación óptica

En la figura 4 se muestra una de las formas de producir pulsos por métodos ópticos. Un dispositivo genera un haz de luz o infrarrojo que es capturado por un receptor. Este receptor genera un pulso eléctrico cada vez que es iluminado. La pieza cuya rotación se quiere medir, al rotar, intercepta intermitentemente el haz luminoso, y con ello genera la serie de pulsos proporcionales necesarios para la medición.

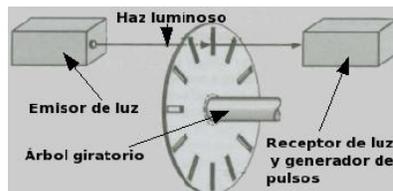


figura 4

Un dispositivo contador como el del punto anterior completa el trabajo.

#### 4.3.4.8 Tacómetros ópticos



Figura 5.

Estos tacómetros, generalmente sin contacto, utilizan un medio luminoso para determinar la velocidad de rotación de las piezas.

En la figura 5 se muestra un esquema que permite comprender el principio de funcionamiento de estos tacómetros.

En general estos aparatos producen un haz luminoso ya sea de tipo LÁSER, de luz visible, o infrarrojo que se dirige a la pieza en movimiento, en la pieza se ha marcado una zona de color blanco que refleja el haz luminoso en mayor proporción que el resto de la superficie, de manera que cada vez que pasa la zona blanca frente al tacómetro se produce por un instante una reflexión mayor del haz. Este pulso luminoso reflejado es detectado por un sensor colocado junto al emisor de luz y convertido a pulso eléctrico dentro del tacómetro. Un circuito convenientemente calibrado a unidades de velocidad de rotación mueve la aguja al valor apropiado o genera un número en una pantalla digital.

**Tacómetro Laser**, este tipo de tacómetro es probablemente el más utilizado en los laboratorios para determinar la potencia de pequeños o grandes motores, su funcionamiento es sencillo, tal y como su nombre lo indica este medidor es capaz de emitir un pequeño láser el cual al chocar con un objeto que este rotando, puede determinar las RPM de dicho objeto y con una regla de conversión se puede saber la potencia del motor que se esté midiendo.

#### 4.3.5 Medidores de campo magnético

La radiación electromagnética (EM) es un fenómeno de permanente presencia en la naturaleza, unas veces de origen natural y otras provocado por el hombre. Todos los campos EM poseen energía, que se manifiestan unas veces como calor, otras como luz u de otras formas.

En función del valor de esta energía, se distinguen dos tipos de radiación EM:

- a) Radiación ionizante (RI)
- b) Radiación no ionizante (RNI)

La RI son campos EM cuya energía está por encima del umbral que permite ionizar la materia, es decir, son capaces de arrancar electrones de un átomo o molécula, por lo que pueden producir cambios de composición en la materia, y por lo tanto producir daños a la salud humana.

La RNI son campos EM cuya energía no es lo suficientemente fuerte como para ionizar la materia y arrancar electrones, por lo que no pueden romper enlaces como los que forman las moléculas que son parte integrante de las células.

Se han hecho investigaciones que tratan de conocer qué tanto los seres humanos y animales somos sensibles a los campos electromagnéticos que generan los diversos aparatos electrodoméstico, de comunicación, industriales, etc. Se afirma que una exposición prolongada a estos campos pueden generar un deterioro en la salud, debido a que la mayoría de las fuentes de campos magnéticos con los que convivimos no están sujetos a una regulación y pueden exceder límites de radiación magnética.

Esta preocupación por los posibles efectos sobre la salud de las nuevas tecnologías, siempre ha existido, con o sin razón, debido a la forma de percibir dichos avances, recuérdese por ejemplo el debate que produjo ya en 1880 la introducción del alumbrado eléctrico en Nueva York. Este caso ejemplifica la necesidad de conocer, medir y caracterizar los efectos y riesgos reales de cada nueva tecnología, con el fin de mantener informada a la población de forma transparente y objetiva.<sup>9</sup>

##### 4.3.5.1 Factores del campo EM al que se está expuesto.

- a) Frecuencia
- b) Intensidad
- c) Tiempos de exposición

El factor principal en la efectividad del acoplamiento de campos EM externos en el cuerpo humano es su **intensidad**. A mayor nivel de campo, mayor acoplamiento, por lo que un mecanismo para reducir el nivel de exposición es alejarse de la fuente.

La **frecuencia** de los campos EM a los que se expone un individuo es otro factor determinante en la efectividad del acoplamiento. Existe una relación directa entre el mecanismo de acoplo, la frecuencia del campo EM y las dimensiones del individuo afectado.

Parece obvio, pero el **tiempo de exposición** a valores elevados de potencia de campo EM es peligrosa.

---

<sup>9</sup> La Comisión Internacional para la Protección sobre RNI, es el organismo científico responsable del desarrollado de estudios de laboratorio y epidemiológicos sobre los efectos directos e indirectos de exposición a campos EM. En estos estudios son recogidas recomendaciones, los criterios básicos de exposición y los niveles de referencia para la evaluación práctica del peligro. Los niveles de referencia y las recomendaciones vienen evaluadas tanto para exposición ocupacional (profesional) como poblacional.

#### 4.3.5.1.1 Efectos

Los principales efectos físicos que se observan en el cuerpo son la inducción de corrientes y la absorción de energía electromagnética, que se traducen principalmente en alteraciones del sistema nervioso y cardiovascular, y en la elevación de la temperatura corporal.

#### 4.3.5.2 Concepto de campo magnético.

El concepto de campo se refiere a la visualización o modelo de una magnitud física que modifica las propiedades de una región del espacio. Puede ser un ente no visible pero sí medible, aunque con el tiempo su significado se ha extendido substancialmente.

En física el concepto fue introducido históricamente ante la necesidad de explicar la forma de interacción a distancia (interacción entre cuerpos en ausencia de contacto físico). En suma, para explicar la acción de las fuerzas de gravedad, eléctrica y magnética.

La *acción a distancia* se explica, entonces, mediante efectos provocados por la entidad causante de la interacción, sobre el espacio mismo que la rodea, permitiendo asignar a dicho espacio propiedades medibles. Así, será posible hacer corresponder a cada punto del espacio valores que dependerán de la magnitud del cuerpo que provoca la interacción y de la ubicación del punto que se considera.

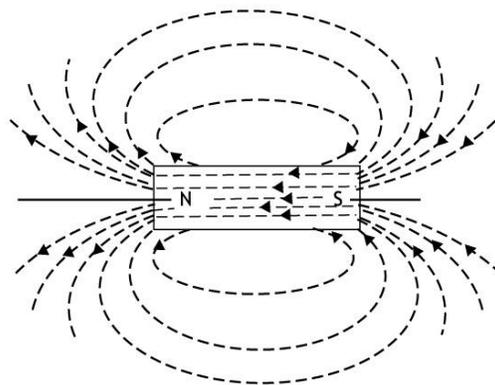
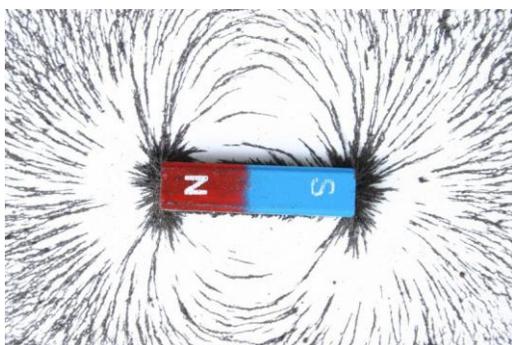
Los campos más conocidos en física clásica son el campo electromagnético, los campos electrostático y magnético, y el campo gravitatorio.

Los fenómenos magnéticos fueron conocidos muy antiguamente, a través de una mineral llamado **magnetita** (de ahí surge el término magnetismo). Es un fenómeno por el que los objetos ejercen fuerzas de **atracción** o **repulsión** sobre otros materiales. Hay materiales que presentan propiedades magnéticas detectables fácilmente, como el níquel, el hierro o el cobalto, que pueden llegar a convertirse en un imán. Sin embargo, todos los materiales son influidos, de mayor o menor forma, por la presencia de un campo magnético.

#### 4.3.5.2.1 Los imanes.

El campo magnético es la alteración que produce un imán a la región que lo rodea. Es decir, es el espacio alrededor del imán en donde son apreciables sus efectos magnéticos, aunque sea imperceptible para nuestros sentidos.

Son los materiales que presentan las propiedades del **magnetismo**. Pueden ser naturales o artificiales. También pueden ser **permanentes** o **temporales**, según el material con el que se fabriquen y según la intensidad de campo magnético al que le sometan.



Cualquier imán presenta dos zonas donde las acciones se manifiestan con mayor fuerza. Son los denominados polos magnéticos, Norte y Sur. El efecto de atracción y repulsión tiene que ver con las líneas de campo magnéticas. Las líneas de campo magnéticas exteriores suelen ir del polo Norte al polo Sur. Por lo tanto, cuando se acercan dos polos opuestos, estas líneas tienen a saltar de un polo a otro: tienden a pegarse. Y según sea la distancia entre los dos imanes esta atracción será mayor o menor.

#### 4.3.5.2.2 Líneas de campo magnético, flujo magnético e intensidad de campo magnético

Para poder representar un campo magnético utilizamos líneas de campo. Estas líneas son cerradas: parten (por convenio) del polo Norte al polo Sur, por el exterior del imán. Sin embargo por el interior circulan a la inversa, de polo Sur a polo Norte. Las líneas de campo no se cruzan, y se van separando, unas de las otras, en alejarse del imán tangencialmente a la dirección del campo en cada punto.

El recorrido de las líneas de fuerza recibe el nombre de circuito magnético, y el número de líneas de fuerza existentes en un circuito magnético se le conoce como flujo magnético. Se representan con la letra griega  $\phi$  y su unidad es el Weber (Wb).

Estas líneas dan la idea de:

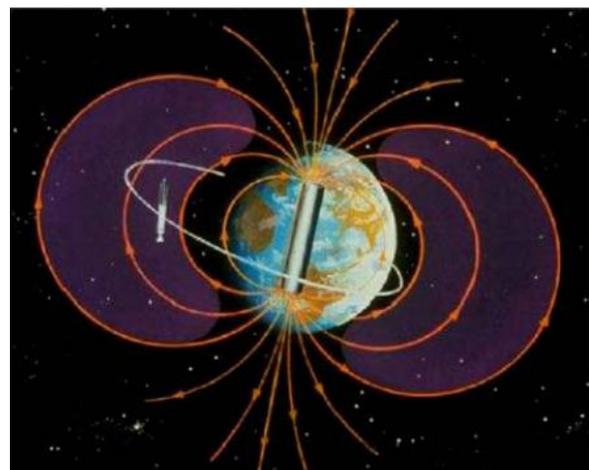
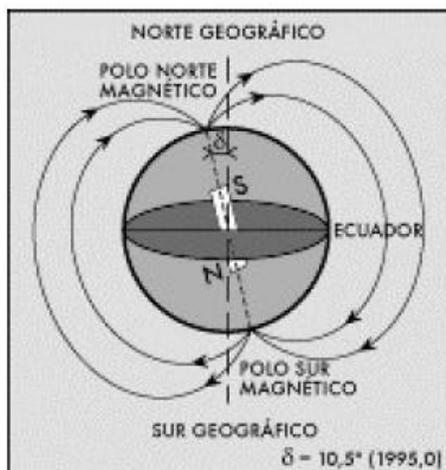
- Dirección que tendrá el campo magnético.
- La intensidad del campo magnético.

En un campo magnético uniforme, la **densidad de flujo de campo magnético** que atraviesa una superficie plana y perpendicular a las líneas de fuerza valdrá:

$$B = \frac{\phi}{S} \text{ la unidad es el Weber/m}^2 \text{ (Tesla (T)).}$$

#### 4.3.5.2.3 Magnetismo terrestre.

La Tierra ha creado a su alrededor un campo magnético semejante al que produciría un imán con forma de barra colocado cerca de su centro. Los polos magnéticos no coinciden con los polos geográficos. En la actualidad, el polo norte magnético y el polo sur geográfico distan entre sí unos 1.300 km, mientras que el polo sur magnético y el polo norte geográfico distan unos 1.200 km entre sí. Además, las posiciones de los polos cambian con el tiempo, habiendo sufrido inversiones completas a un promedio de cada  $10^6$  años.



No se sabe cuáles son las causas del campo magnético de la Tierra. Como ocurre con muchos fenómenos físicos, conocemos las propiedades y la existencia del campo, pero no su origen. Por siglos, los marineros han guiado sus barcos con brújulas, cuyo material magnetizado se encuentra en forma natural o puede fabricarse.

En la actualidad, los científicos creen que los movimientos de los iones dentro del centro líquido del planeta causan este fenómeno.

La existencia del campo magnético terrestre ejerce un efecto protector de la vida sobre la Tierra. De no ser por él, el nivel de radiación procedente del espacio sería mucho más alto y el desarrollo y mantenimiento de la vida en la forma actualmente conocida probablemente no hubiera sido posible.

#### **4.3.5.2.4 La brújula. El primer magnetómetro.**

No se conoce con exactitud el origen de la brújula, pero se cree que fueron los chinos, hace aproximadamente 2.500 años antes de Cristo, los inventores de ésta. Los chinos usaban un trocito de caña en la cual se insertaba una aguja magnetizada que se hacía flotar sobre el agua, y con este sencillo procedimiento se podía conocer el norte magnético, pues el concepto de magnetismo ya era conocido.

La existencia de un campo magnético se pone en evidencia por la propiedad localizada en el espacio de orientar un magnetómetro (laminilla de acero imantado que puede girar libremente). La aguja de una brújula, que pone en evidencia la existencia del campo magnético terrestre, puede ser considerada el primer magnetómetro usado por el hombre.

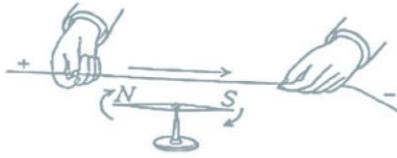
Un magnetómetro mide la presencia magnética en la superficie terrestre. La tierra genera un campo magnético en el rango de aproximadamente 0,30000 a 0,65000G (= Gauss, o Oersted).



#### **4.3.5.2.5 Descubrimiento del electromagnetismo.**

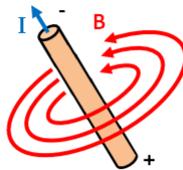
Hasta los principios del siglo XIX se consideraba el magnetismo como fenómeno independiente y aún envuelto por el misticismo. En 1820, Juan Cristian Oersted, al experimentar con la corriente eléctrica que había sido introducida por Volta pocos años antes, encontró una conexión entre ésta y las agujas de las brújulas. Algo se sospechaba desde hacía algún tiempo. Los marinos contaban que los rayos de las tormentas provocaban vibraciones en las agujas de las brújulas y que eran capaces de imantar cucharas y tenedores, pero nadie podía comprender la existencia de magnetismo sin imanes.

Su manera de buscar la conexión entre la electricidad y el magnetismo consistió en hacer pasar corrientes eléctricas por conductores colocando cerca imanes en diferentes posiciones. Oersted observó que la aguja magnética de la brújula giraba bruscamente y cambiaba de posición en tanto circulaba la corriente. Repitió su acción para distintas posiciones de la brújula. Si el conductor estaba inicialmente paralelo y por encima de la aguja, al pasar la corriente, ésta se colocaba perpendicularmente al conductor. Lo mismo ocurría si el conductor se situaba paralelo y por debajo de la aguja, pero si en el primer caso, la aguja señalaba el este, ahora indicaba el oeste. El mismo fenómeno se observaba dejando inmóvil la brújula, pero cambiando el sentido de la corriente eléctrica. De este modo confirmó que el flujo de corriente eléctrica había creado un campo magnético alrededor del conductor. Por primera vez se confirmó experimentalmente la relación física entre la electricidad y el magnetismo.



#### 4.3.5.2.6 Ley de Ampère.<sup>10</sup>

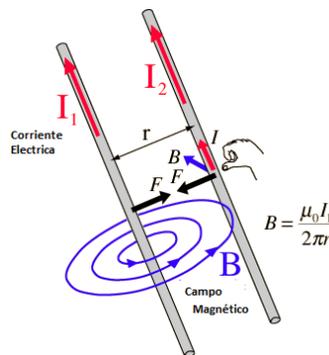
El campo creado por un hilo conductor infinito por el que circula una corriente  $I$  a una distancia  $r$  del mismo es un campo con forma circular, cuyas líneas encierran la corriente. La dirección del campo en un punto es tangencial al círculo que encierra la corriente. La magnitud del campo magnético disminuye inversamente con la distancia al conductor.



El campo magnético de un cable recto infinitamente largo, se puede obtener aplicando la ley de Ampere. La expresión para el campo magnético es

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r}$$

Además, Ampère anunció un hecho novedoso: era posible la acción mutua entre corrientes sin que interviniera ningún imán. Dos hilos conductores paralelos por los que circulan corrientes eléctricas se atraen o se repelen en función de si los sentidos de las corrientes son iguales u opuestos, respectivamente. Poco tiempo después Ampère formularía la expresión matemática que explicaba estas fuerzas entre corrientes eléctricas

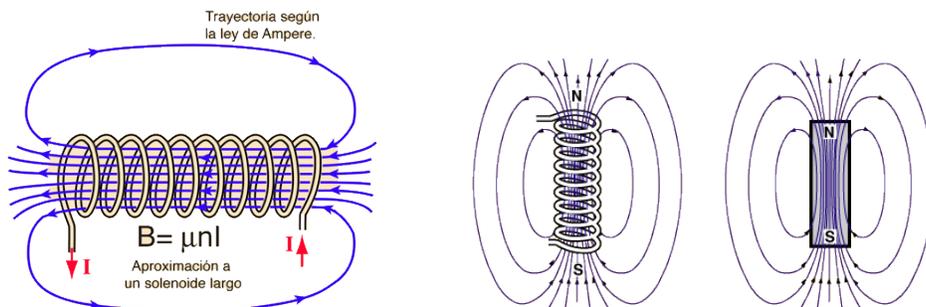


En 1826 publicó su libro “La teoría matemática de los fenómenos electrodinámicos deducida únicamente de la experiencia”, libro en el que afirma que “el magnetismo es electricidad en movimiento” y que “los fenómenos magnéticos dependen sólo de la existencia y del movimiento de cargas eléctricas”.

<sup>10</sup> André-Marie nunca fue a la escuela, excepto para dar clase él mismo.

#### 4.3.5.2.7 Campo magnético creado por un solenoide:

Se puede utilizar un embobinado (vueltas de alambre) largo y recto de hilo eléctrico, para generar un campo magnético uniforme casi similar a la de un imán de barra. Tales bobinas, llamadas solenoides, tienen una enorme cantidad de aplicaciones prácticas. El campo puede ser muy reforzado por la adición de un núcleo de hierro. Dichos núcleos son típicos en los electroimanes.



En la expresión anterior,  $n = N/L$  es el número de vueltas por unidad de longitud, a veces llamado "densidad de vueltas". La expresión es una idealización para un solenoide de longitud infinita, pero proporciona una buena aproximación al campo magnético de un solenoide largo.

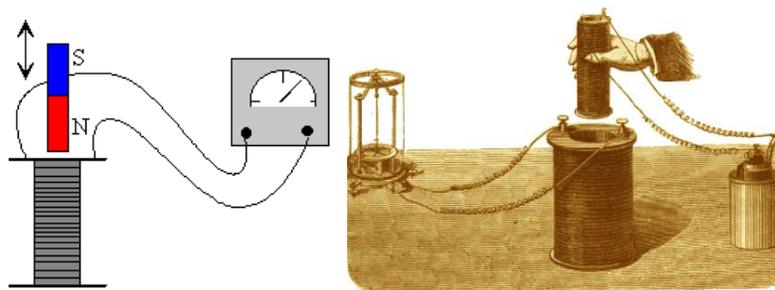
El campo magnético en un solenoide largo se concentra en su centro, en un campo casi uniforme. El campo exterior es débil y divergente.

#### 4.3.5.2.8 Ley de Faraday

Una vez demostrado que una corriente eléctrica crea un campo magnético, Faraday en 1831 logró demostrar también el hecho inverso: un campo magnético crea una corriente eléctrica. La explicación teórica fue:

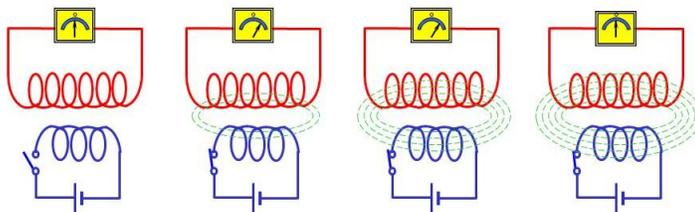
- Es necesario un campo magnético variable (imán, bobina o cable en movimiento) para crear una corriente eléctrica en el cable o en la bobina.
- Esta corriente se conoce como corriente inducida, y el fenómeno como inducción electromagnética. La corriente eléctrica inducida existe mientras dure la variación del campo magnético.
- La intensidad de la corriente eléctrica es tanto mayor cuanto más intenso sea el campo magnético y cuanto más rápido se muevan el imán y la bobina.

Faraday conectó los dos extremos del solenoide a un amperímetro. Al no haber un generador de corriente eléctrica, no detectó ninguna variación en el amperímetro. Enseguida introdujo un imán en el solenoide y tampoco detectó en el amperímetro ningún paso de corriente eléctrica. Sin embargo, cuando movió el imán dentro del solenoide, el amperímetro marcó paso de corriente eléctrica. Faraday demostró así que un imán en movimiento crea una corriente eléctrica en un hilo conductor que se encuentre cerca de él.



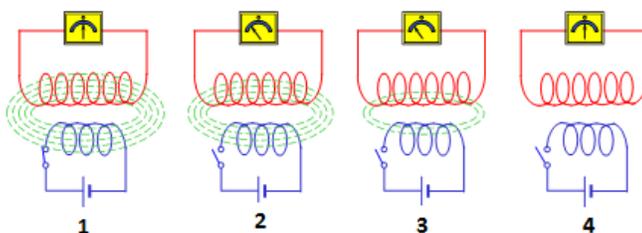
#### 4.3.5.2.9 Fuerza electromotriz inducida por la variación de la intensidad del campo magnético.

Supongamos un circuito formado por dos solenoides, el primero, al que denominamos bobina primaria, alimentado por una batería y el segundo, al que denominamos bobina secundaria y cuyo circuito está cerrado por un amperímetro, tal como se indica en la figura.



Al cerrarse el interruptor, la corriente circula por la bobina primaria y el flujo en expansión corta el devanado secundario e induce en él una f.e.m. provocando una corriente eléctrica. Una vez que el flujo está completamente expandido, es decir, en su valor máximo, no hay variación de flujo en el secundario, por lo tanto aparece que la corriente inducida es cero.

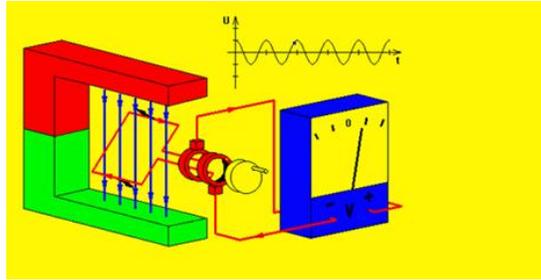
Al abrirse el interruptor (2), el campo magnético desaparece, dando lugar a la aparición de una nueva f.e.m., y provocando una corriente eléctrica de sentido **contrario** a la anterior. Una vez que el flujo ha desaparecido por completo, no hay variación de flujo en el secundario, por lo tanto la corriente nuevamente es cero.



Siempre que haya una **variación de flujo** que corta las espiras de una bobina, se induce en esta una f.e.m., dando lugar a una corriente eléctrica siempre y cuando el circuito se encuentre cerrado.

#### 4.3.5.2.10 Principio del generador de corriente eléctrica.

Un generador funciona por el principio de inducción magnética. Como puede observarse en la Figura 1, se cuenta con un imán, y se muestra el polo norte y el polo sur, entre ellos se genera un campo magnético constante. Entre los dos polos permanentes se coloca un conductor enrollado o con una vuelta, que es realmente una bobina, y esta tiene dos puntas conectadas a un equipo de medición (Voltmetro), en estas dos puntas es en donde se obtiene la energía eléctrica. Si esta bobina se hace girar (por medio de motor o turbinas) dentro del campo magnético de los imanes, el conductor enrollado o bobina estará rompiendo líneas de campo magnético es decir estará en un campo magnético variable y se inducirá un voltaje en la bobina, generando de esta manera energía eléctrica. Es importante mencionar que la energía eléctrica obtenida es alterna y generará una señal o forma de onda senoidal. Esto es debido a que un conductor se encuentra en un instante en el polo norte del imán y posteriormente este mismo conductor se encuentra en el polo sur del imán. El voltaje generado depende del número de espiras que tenga la bobina y de la velocidad con la que se hace girar a la bobina, esto da origen a la frecuencia y en la práctica esta velocidad debe ser un múltiplo de 60 Hz ya que es la frecuencia utilizada en México.



Este es el esquema básico de un generador. Cuando la espira gira cortando las líneas de flujo magnético entre los dos imanes se genera en ella una fuerza electro motriz inducida o corriente eléctrica

#### 4.3.5.3 Medidores de campo

Los medidas de campos electromagnéticos se pueden clasificar en dos tipos:

a) Medidores de baja frecuencia (campo cercano):

Son exclusivos, es decir, o son para campo magnético o son para campo eléctrico, ya que son de **campo cercano**. En campo cercano hay que medir ambos campos por separado, ya que no están acoplados, es decir, no existe una relación directa entre ambos que facilite el cálculo de uno de ellos a través de la medida del otro.

b) Medidores de alta frecuencia (campo lejano)

Los más comunes son los basados en sensores para campo eléctrico, y su elemento sensor se basa en termopares o en dipolos (o monopolos) cortos con un detector schottky. Miden campo eléctrico y calculan el campo magnético y la densidad de potencia en base a la hipótesis de medida de campo lejano.

También se pueden clasificar en:

**De banda ancha** (broadband), se utilizan equipos de medida de banda ancha capaces de relevar cada señal dentro de una amplia gama de frecuencia. Se utiliza una sonda isotrópica.

**Selectivos en frecuencia**, para este sistema de medición se utiliza analizadores de espectro o receptores de banda ancha selectivos en frecuencia. Son medidores selectivos en frecuencia, que miden la energía radiada total existente en el punto de medida, dentro del ancho de banda para el cual están diseñados.

También se pueden clasificar en base a su tecnología de captación:

- a) De campo magnético
- b) De campo eléctrico

En general, un medidor de campo se compone de:

1. Un sensor o antena isotrópica con detector de RF.
2. Un medidor con o sin registrador de datos.
3. Una línea de unión eléctrica entre el sensor y el medidor.
4. Una línea de transmisión de datos y control entre el medidor y el registrador (que en muchas ocasiones será un PC)

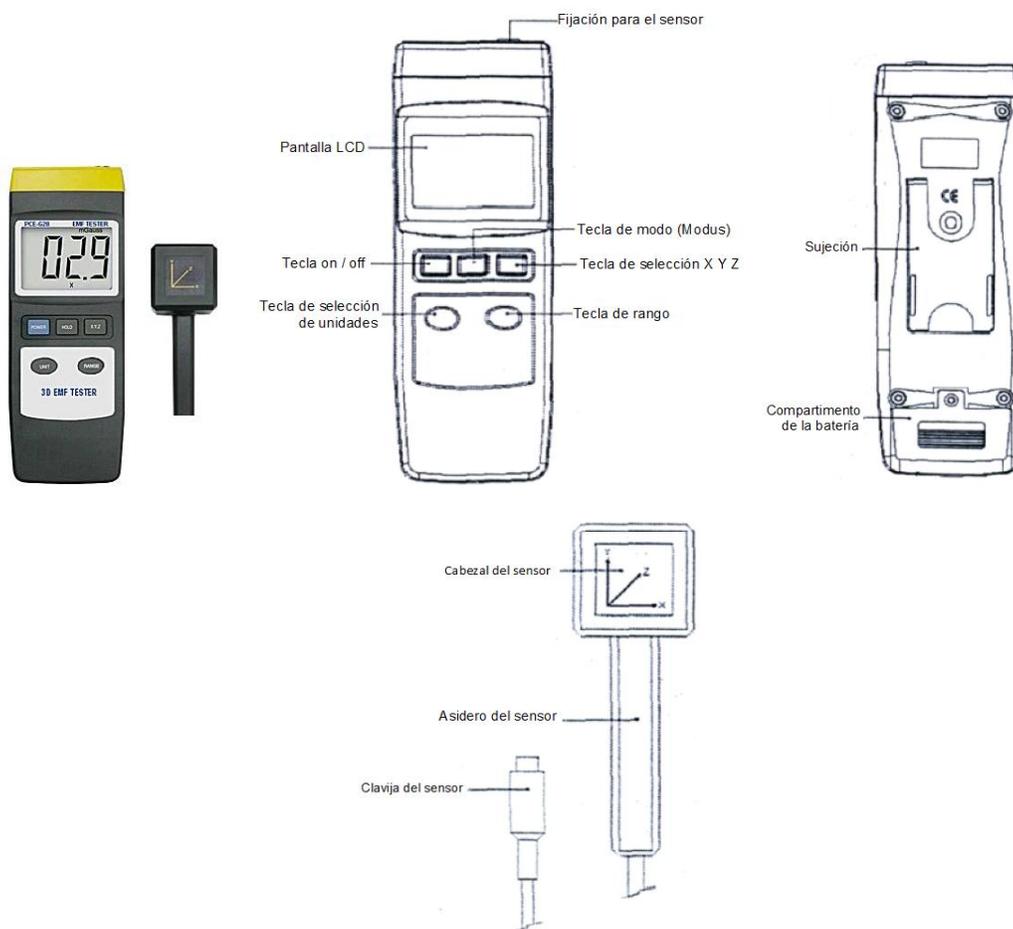
#### 4.3.5.4 Información sobre los campos electromagnéticos

Los campos electromagnéticos se originan en las instalaciones y aparatos eléctricos. Pueden tener una fuerte influencia sobre nuestro organismo dependiendo de su frecuencia. Las consecuencias pueden ir desde el malestar general y la excitación nerviosa hasta las quemaduras internas. Por ello, basándose en las leyes de protección laboral y las disposiciones industriales, se hace necesario determinar el riesgo de los trabajadores expuestos a los campos electromagnéticos.

Básicamente existen dos ámbitos de influencia, los denominados ámbitos de exposición 1 y 2: El ámbito de exposición 1 abarca todos los ámbitos controlados, p.e. los talleres eléctricos industriales y los ámbitos controlados por la empresa. Abarca ámbitos de acceso general en los que se garantiza una breve exposición debido al modo de empleo de la instalación. Esta breve exposición se refiere a un turno laboral. El encargado de seguridad puede determinar la radiación electromagnética en Gauss o en Tesla y clasificarla con la ayuda del aparato. De manera especial, con una frecuencia técnica energética de  $f = 50 \text{ Hz}$  en el ámbito de exposición 1 el valor límite se considera  $1,36 \mu\text{T}$ , en el ámbito 2 el valor es  $0,42 \mu\text{T}$ .

#### 4.3.5.5 El Teslámetro PCE-G28

El teslámetro para determinar la radiación electromagnética. El teslámetro PCE-G28 ha sido concebido para medir campos magnéticos originados por monitores de ordenadores, televisores, instalaciones eléctricas industriales. Este pequeño teslámetro de campos magnéticos tiene unas características propias para el uso industrial pero también se adecua al ámbito del laboratorio.



#### 4.3.5.1 Características principales.

Pantalla	LCD, de 3 ½ posiciones
Ejes de medición	tres ejes; ( X,Y,Z),
Frecuencia	de 30 Hz a 300Hz
Rango de radiación	micro Tesla: 20 micro Tesla / 0,01 micro Tesla 200 micro Tesla / 0,1 micro Tesla 2000 micro Tesla / 1 micro Tesla

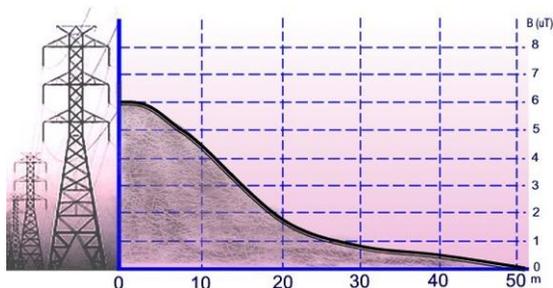
#### 4.3.5.2 Ejemplo de utilización del teslametro PCE-G28.



En las imágenes que aparecen en la parte superior, podrá ver como el teslámetro PCE-G28 realiza un test de la radiación emitida por un monitor y un centro de carga eléctrico. Por medio de su sonda triaxial, este teslámetro detecta las tres componentes espaciales o vectoriales del campo magnético. La radiación magnética es la componente de la radiación electromagnética que más puede afectar al ser vivo.

#### 4.3.5.6 Variación del campo magnético con la distancia

Valores de densidad de flujo magnético (B, en microteslas,  $\mu\text{T}$ ), medidos a un metro de altura sobre el suelo, en las cercanías de una línea de transporte eléctrico (la torre no está representada a escala). Se observa que los valores de B se reducen significativamente al aumentar la distancia a la línea. Así, en la vertical de la línea, B podría alcanzar valores de hasta 6  $\mu\text{T}$ ; a 15 metros de la línea, B se reduciría a la mitad y para distancias superiores a 30 metros, B estaría en el orden de las décimas de microtesla.



### 4.3.6 Analizador de Fourier.

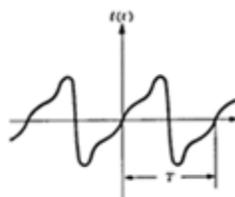
#### 4.3.6.1 Conceptos básicos.

El análisis de Fourier es un método de análisis de formas de onda periódicas complejas. Permite que cualquier función periódica no senoidal sea expresada en ondas seno o coseno (posiblemente en un número infinito) y una componente de c.d. Esto permite realizar un análisis más detallado y permite determinar el efecto de combinar la forma de onda con otras señales.

El procedimiento matemático generalizado para calcular las amplitudes y frecuencias de esas componentes fue ideado por el matemático francés Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) quien demostró que cualquier movimiento oscilatorio periódico puede representarse como una combinación de movimientos *armónicos* simples que deben tener el valor adecuado para que el grupo de componentes se combine para formar la onda que se ha de reconstruir.

Nota: Una señal periódica es aquella que vuelve a tener repetidamente el mismo valor después de transcurrido un tiempo  $T$  segundos, donde  $T$  se nombra como período. El valor de  $f(t)$  en un instante dado  $t_1$  es el mismo en  $t_1+T$ . Simbólicamente:

$$f(t) = f(t + T)$$



Una función periódica

En estas notas no se puede tratar el tema de la Serie de Fourier con profundidad, debido a su gran contenido matemático. El enfoque que aquí se le da es su aplicación práctica en el análisis de algunas señales eléctricas. Por ejemplo, si  $f(t)$  representa un movimiento de ondas que tiene período  $T$ , el teorema propuesto por Fourier asegura que  $f(t)$  puede descomponerse en una serie de componentes armónicos simples de la siguiente manera:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \text{Sen}(n \cdot \omega_0 \cdot t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \text{Cos}(n \cdot \omega_0 \cdot t)$$

$$f(t) = A_0 + A_1 \text{ sen } \omega t + A_2 \text{ sen } 2 \omega t + A_3 \text{ sen } 3 \omega t + \dots$$

$$B_1 \text{ cos } \omega t + B_2 \text{ cos } 2 \omega t + B_3 \text{ cos } 3 \omega t + \dots$$

Donde  $A_0$  = la componente de c.d. de la onda original.

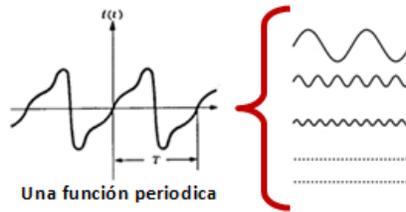
Las  $A$  y las  $B$  son constantes que tienen valores definidos para cada señal ondulatoria periódica  $f(t)$  en particular. Estos componentes frecuenciales constituyen un espectro discreto.

$A_1 \text{ sen } \omega t + B_1 \text{ cos } \omega t$  = la componente fundamental (tiene la misma frecuencia y periodo que la onda original)

$A_n \text{ sen } n\omega t + B_n \text{ cos } n\omega t$  = la componente armónica  $n^{\text{ésima}}$  de la función  $f(t)$ .

$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f$  = frecuencia angular fundamental, o  $2\pi$  veces la frecuencia de la onda periódica original.

El proceso de análisis anteriormente mostrado, se puede resumir en la siguiente figura:



#### 4.3.6.2 La serie de Fourier de una onda cuadrada.

Un caso típico es la generación de una señal cuadrada con generadores armónicos impares.

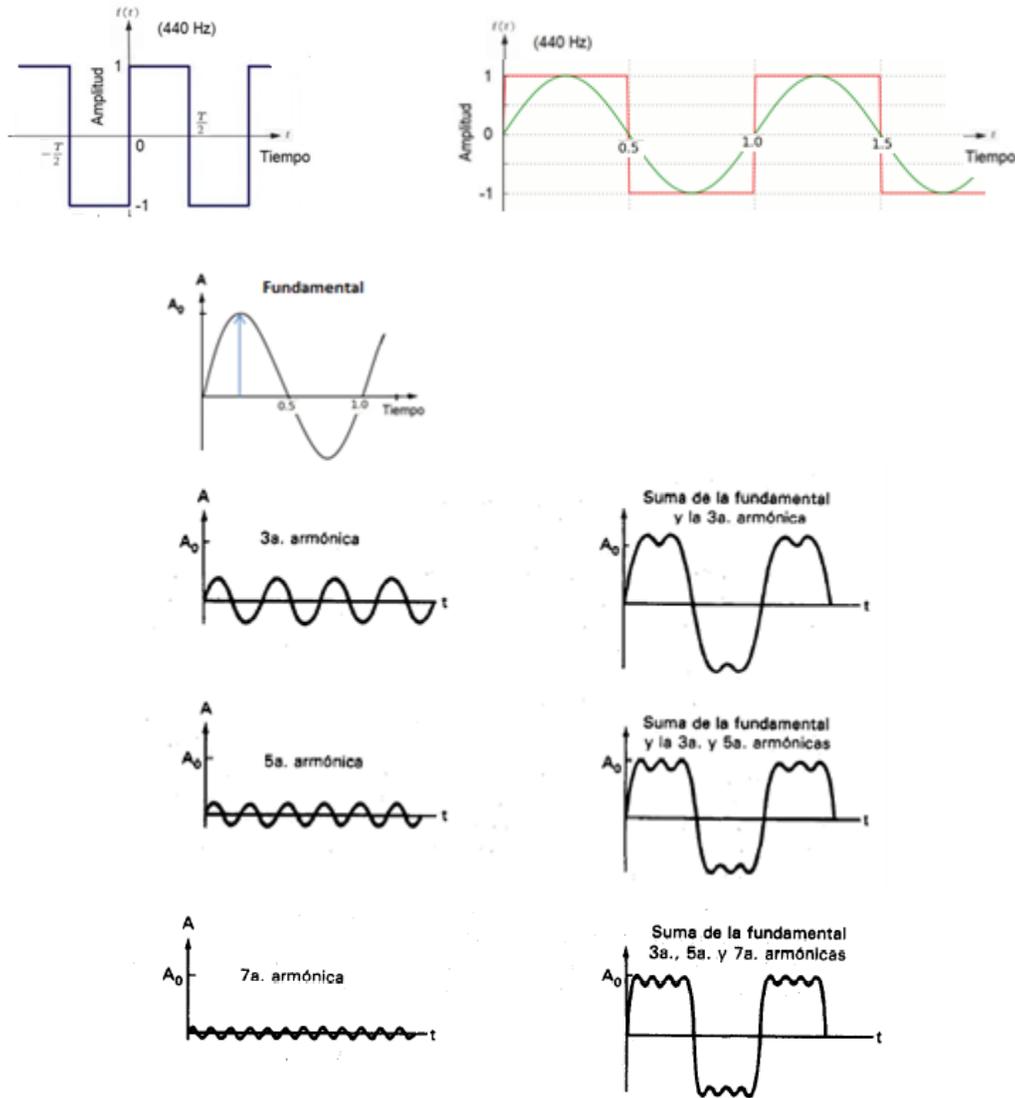


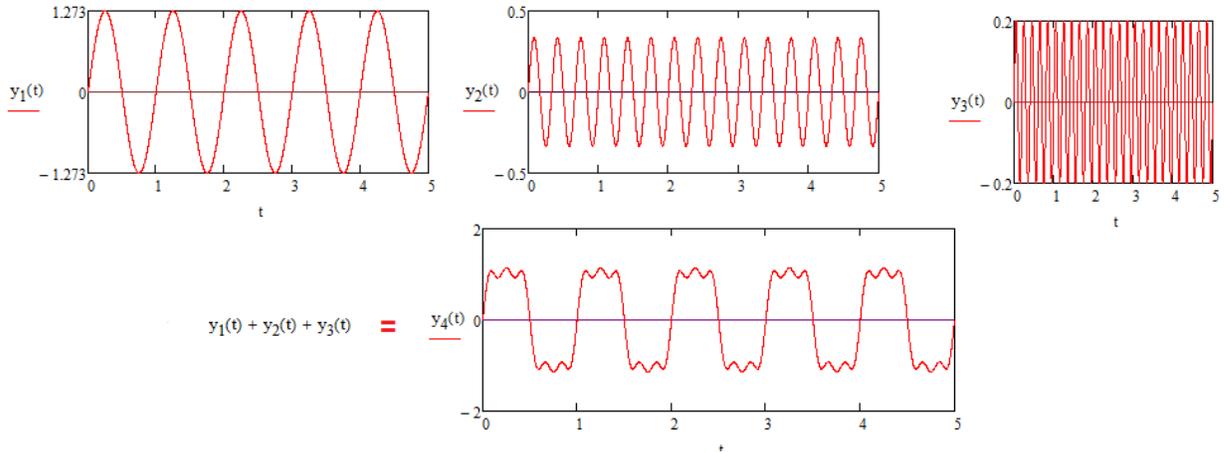
Figura 8-10 Análisis de Fourier de una onda cuadrada.

La solución matemática es:

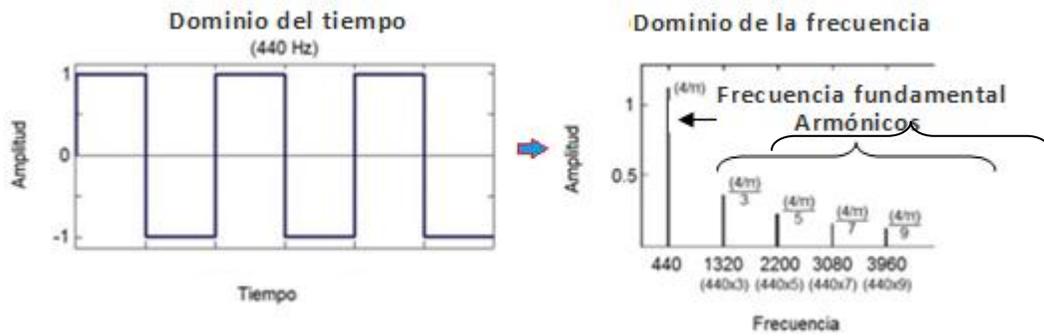
$$f(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1, \text{impar}}^{\infty} \frac{1}{n} \text{sen}(n\omega_0 t)$$

$$f(t) = \frac{4}{\pi} \left( \sin \omega_0 + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t + \dots \right)$$

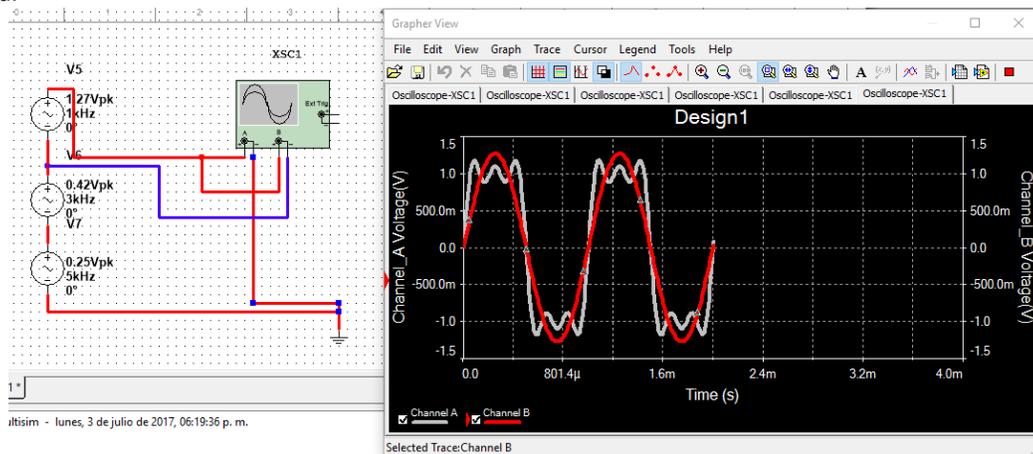
Si sumamos gráficamente las tres componentes de la onda cuadrada, en el programa MATHCAD 14, vemos que el resultado se aproxima:



La descomposición espectral de la onda cuadrada de acuerdo a sus componentes de la serie de Fourier es:



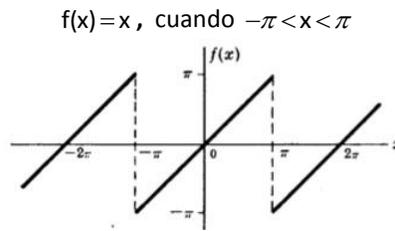
La simulación en MULTISIM es una extraordinaria ayuda para entender el tema de la serie de Fourier en forma intuitiva.



Onda cuadrada con 3 generadores de Fourier armónicos impares

#### 4.3.6.3 Descomposición espectral de otras formas de onda:

Vamos a indicar que la serie de Fourier de una señal diente de sierra, descrita por la función



es

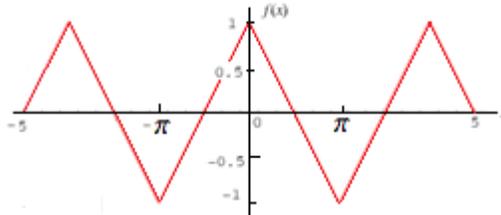
$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \text{sen}(nx)$$

$$b_n = \frac{2}{n} (-1)^{n+1}$$

$$f(x) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-(-1)^n}{n} \cdot \text{sen}(n\pi x)$$

$$f(x) = 2 \cdot \left[ \text{sen}x - \frac{\text{sen}(2x)}{2} + \frac{\text{sen}(3x)}{3} - \frac{\text{sen}(4x)}{4} + \dots \right]$$

Para completar el tema vamos a indicar que la serie de Fourier de una señal triangular, descrita por la función



es

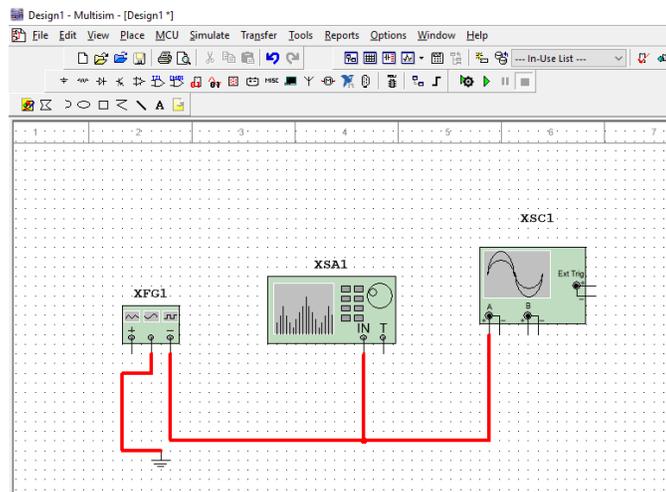
$$f(x) = \frac{8}{\pi^2} \cdot \left[ \cos x - \frac{\cos(3x)}{3^2} + \frac{\cos(5x)}{5^2} - \frac{\cos(7x)}{7^2} + \dots \right]$$

Cada componente de frecuencia (o término) de la respuesta es producido por el armónico correspondiente de la forma de onda periódica. Cada término se considera una fuente separada. De acuerdo al principio de superposición, la respuesta total es la suma de las respuestas producidas por cada término. Obsérvese que la amplitud de los armónicos disminuye progresivamente a medida que el orden de los armónicos aumenta. Esto indica que con pocos términos se produce una buena aproximación.

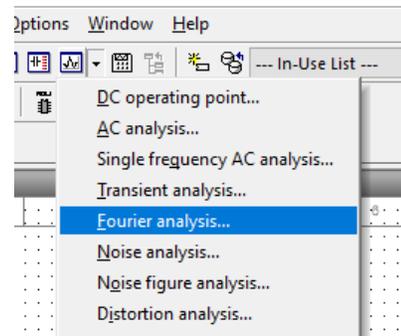
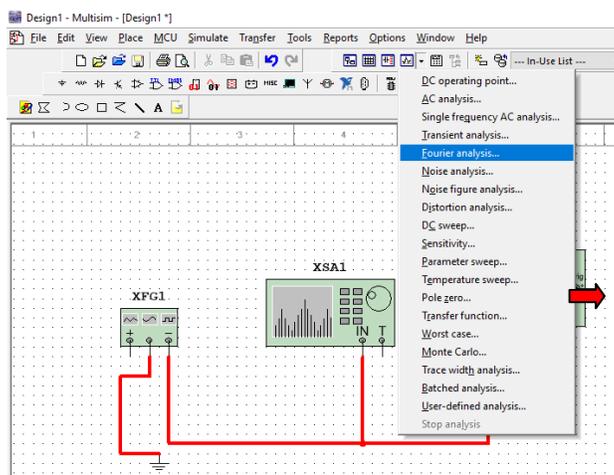
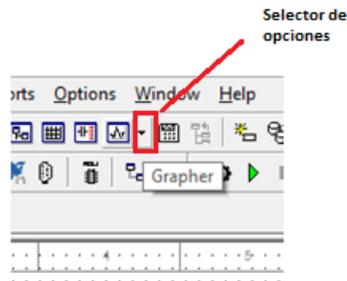
Cuando Multisim realiza cálculos de transformada de Fourier discreta (DFT), sólo se usa el segundo ciclo de la componente fundamental de una respuesta dependiente del tiempo o transitoria (extraída en el nodo de salida). El primer ciclo se descarta para el tiempo de asentamiento. El coeficiente de cada armónico se calcula a partir de los datos recogidos en el dominio del tiempo, desde el inicio del ciclo al punto de tiempo "t". Se establece automáticamente y es una función de la frecuencia. Este análisis requiere una frecuencia fundamental que coincida con la frecuencia de la fuente de c.a. o el factor común más bajo de fuentes de c.a. múltiples.

#### 4.3.6.4 Análisis de Fourier en el programa Multisim.

Construimos el circuito como el que se muestra a continuación:



En la barra de herramientas esta el icono , y junto a él está el Selector de opciones con la que, al presionarlo, aparece una cortina de ellas:



Seleccionamos *Fourier analysis*, con lo cual aparecerá el siguiente cuadro de configuraciones:

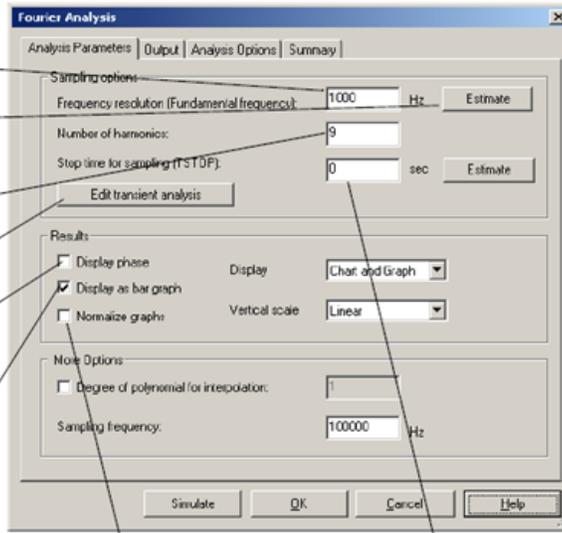
Ajuste a la frecuencia de una fuente de c.a. en su circuito. Si usted tiene varias fuentes de c.a., utilice el factor común más bajo de frecuencias. Haga clic para tener la frecuencia fundamental estimada.

Ajuste el número de armónicos de la frecuencia fundamental que se calculó.

Haga clic para establecer parámetros para análisis transitorio asociado.

Habilitar para mostrar los resultados como fase.

Habilitar para mostrar resultados como gráfico de barra. Si no está activado, los resultados se muestran como gráfico de línea.



Habilitar para normalizar gráficos. Los gráficos normalizados son normalizado contra el 1er armónico.

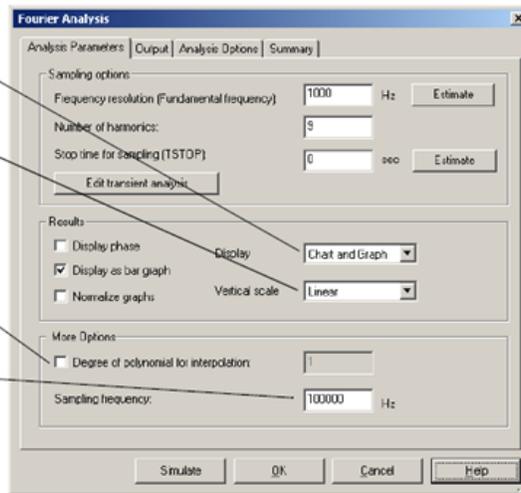
Establezca la cantidad de tiempo durante el cual debe ocurrir el muestreo (o utilice Editar Análisis de Transitorios).

Elija una opción de visualización: esquema, gráfico o esquema y gráfica.

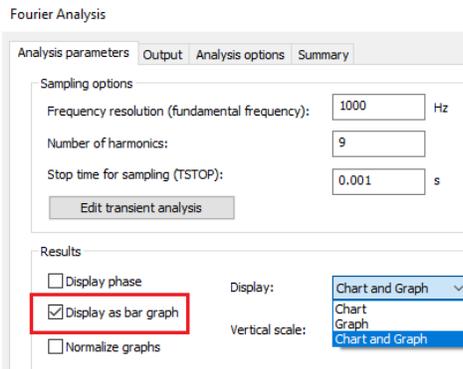
Elija una escala vertical: lineal, logarítmica, decibel u octava.

Habilitar para ingresar grado a ser usado al interpolar entre puntos en simulación.

Especifica una frecuencia de muestreo.



El análisis de Fourier produce una gráfica de las magnitudes de las componentes del voltaje de Fourier y, opcionalmente, componentes de fase versus frecuencia. Por defecto, la gráfica de magnitud es una gráfica de barras, pero puede ser mostrada como una gráfica de líneas.



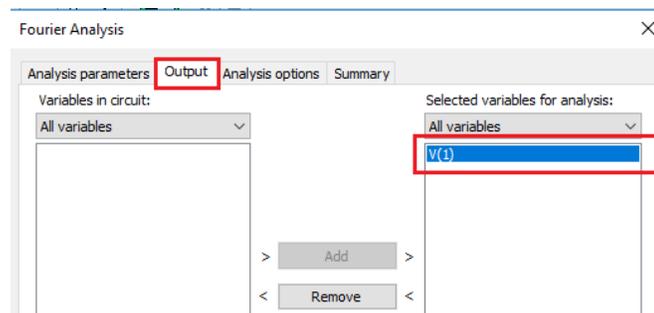
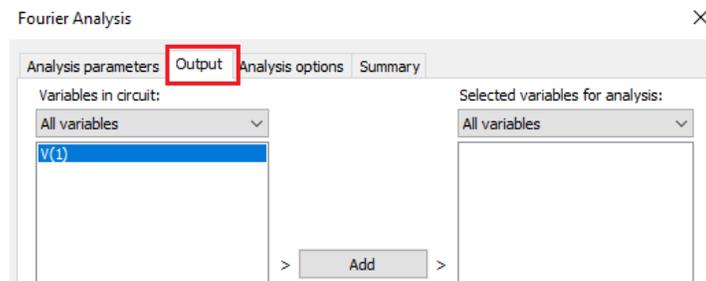
#### 4.3.6.5 Configuración de los parámetros de análisis de Fourier para uso normal

Para uso normal, sólo tiene que especificar parámetros para lo siguiente:

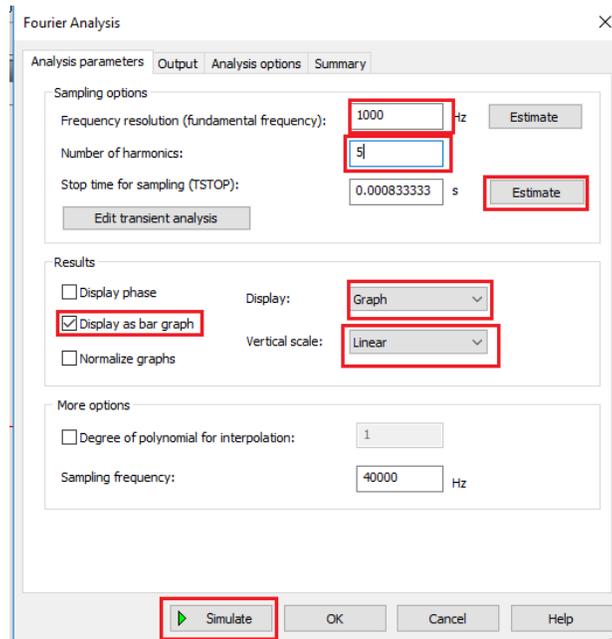
- Usar la frecuencia bajo prueba, o ya sea haciendo clic en *Estimar* para tener un valor seleccionado basado en fuentes el c.a. en el circuito, o introduciendo un valor en el campo de la *Resolución de frecuencia (Frecuencia Fundamental)*. Este valor debe ser el factor común más bajo para las frecuencias presentes en el circuito.
- Número de armónicos, al introducir un valor en el campo *Número de armónicos*. Usted puede especificar el tiempo de parada para el muestreo para evitar resultados transitorios no deseados antes de que el circuito llegue al estado estacionario.
- Tiempo de parada para el muestreo habilitando *Tiempo de parada para muestreo (TSTOP)* e ingresando un nuevo tiempo de parada para el muestreo. Aunque la razón de Nyquist especifica solamente dos veces la componente de frecuencia más alta considerada en el análisis como una razón de muestreo adecuada, se recomienda especificar una frecuencia de muestreo suficiente para obtener un mínimo de 10 puntos de muestreo por período.
- Ingrese un valor en el campo *Frecuencia de muestreo*.

Nota: La frecuencia de muestreo debe ser igual a la resolución de frecuencia (el número de armónicos más uno) multiplicado por al menos 10.

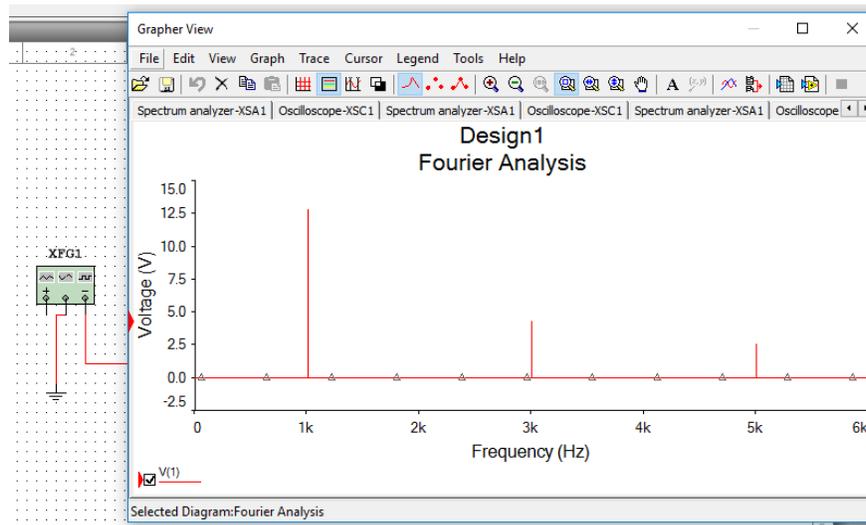
Antes de realizar el análisis, seleccione un nodo de salida en la caja de diálogo **Output**. La variable de salida es el nodo desde el cual el análisis extrae la forma de onda de voltaje.



Se corre el programa con las siguientes configuraciones:

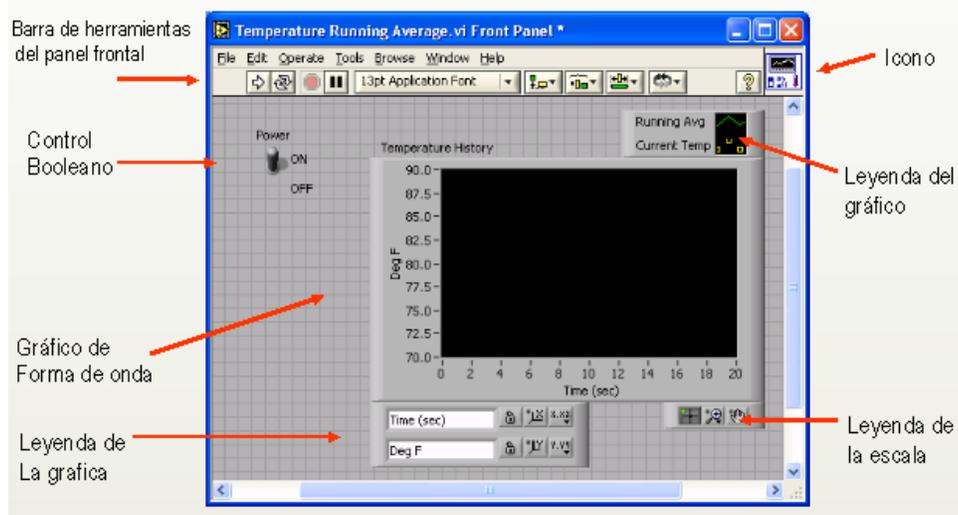


Resultados:



#### 4.4 Introducción al manejo de instrumentos virtuales

La instrumentación virtual supone un nuevo enfoque de la instrumentación tradicional que incorpora nuevas características y elementos de sistema añadiendo mejoras tecnológicas basadas en las innovaciones científicas, además de reducir los costos de la producción de los sistemas y beneficiar el uso de nuevas tecnologías logrando un mercado más amplio y una plataforma de diseño extremadamente flexible y eficiente.



Panel frontal de un Instrumento Virtual (VI)

##### 4.4.1 Evolución de la instrumentación.

Históricamente, los sistemas de instrumentación tradicional se han basado en el uso de aparatos o instrumentos de medición individuales, los cuales incluyen el uso de sensores o transductores para adquirir variables físicas y convertirlas a señales eléctricas que el usuario pueda interpretar para su posterior registro o procesamiento. Sin embargo, en dichos sistemas se tienen varios inconvenientes que incluyen el hecho de que se requieran diferentes aparatos físicos para medir múltiples variables, con la desventaja que representa la portabilidad de los mismos; además, dichos aparatos pueden incluir diferentes interfaces o no incluirlas, lo cual ocasiona que no puedan ingresarse los datos a la computadora de manera automática. Lo anterior representa las mayores desventajas en el uso de sistemas de instrumentación tradicionales, ya que no se tiene interacción con equipos de cómputo en tiempo real, aunado a la nula posibilidad de comunicación inalámbrica y aplicaciones móviles.

Debido a esto, la instrumentación se ha caracterizado por un incremento continuo en cuanto a flexibilidad y escalabilidad de equipos e instrumentos de medición, así como de las interfaces que permitan ingresar datos a alta velocidad en la computadora para su posterior análisis y procesamiento. Todo esto ha llevado al nacimiento de la instrumentación virtual, el cual es un término asociado al uso de instrumentos virtuales (*virtual instruments* o VIs) dado que se encuentran dentro de la computadora y mediante los cuales se pueden desarrollar aplicaciones computacionales basadas en interfaces gráficas de usuario (*graphical user interfaces* o GUIs).

La interacción entre la computadora y usuario se realiza utilizando un lenguaje de programación gráfico que permite la adquisición de datos<sup>11</sup>, el procesamiento de la información y el despliegue y registro de la misma.

<sup>11</sup> Proceso mediante el cual se miden parámetros físicos reales de variables como voltaje, corriente, temperatura, flujo, nivel, posición, etc.

La instrumentación virtual es un concepto introducido por la compañía National Instruments. En el año de 1983, Truchard y Kodosky, de National Instruments, decidieron enfrentar el problema de crear un software que permitiera utilizar la computadora personal (PC) como un instrumento para realizar mediciones.

De esta manera surge el concepto de instrumento virtual (IV), definido como, "un instrumento que no es real, se ejecuta en una computadora y tiene sus funciones definidas por software." (National Instruments, 2001). A este software le dieron el nombre de *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*, más comúnmente conocido por las siglas LabVIEW. A partir del concepto de instrumento virtual, se define la instrumentación virtual como un sistema de medición, análisis y control de señales físicas con una PC por medio de instrumentos virtuales. LabVIEW, el primer software empleado para diseñar instrumentos en la PC, es un software que emplea una metodología de programación gráfica, a diferencia de los lenguajes de programación tradicionales. Su código no se realiza mediante secuencias de texto, sino en forma gráfica, similar a un diagrama de flujo.

LabVIEW es un lenguaje de programación gráfica, que se ejecuta a velocidades comparables con programas compilados en C; igualmente, un instrumento virtual es un módulo de software, realizado gráficamente para que parezca un instrumento físico; tiene un panel frontal que sirve como interface interactiva para entradas y salidas, un diagrama a bloques que determina la funcionalidad del IV.

Una característica muy importante del LabVIEW que, por ser conceptualmente simple, los estudiantes se pueden concentrar en el contenido básico de un experimento, no perdiendo tiempo en actividades menos importantes, como la recolección de datos.

Un instrumento tradicional, se caracteriza por realizar una o varias funciones específicas que no pueden ser modificadas. Un IV es una combinación de elementos de hardware y software usados en una PC, que cumple las mismas funciones que un instrumento tradicional. A diferencia de un instrumento convencional, un IV es altamente flexible y puede ser diseñado por el usuario de acuerdo con sus necesidades y sus funciones pueden ser cambiadas a voluntad modificando el programa. Estas características de los instrumentos virtuales los convierten en una herramienta didáctica muy importante para aplicarse en el aprendizaje de los estudiantes de las ciencias naturales y de ingeniería.

En la enseñanza de la ingeniería, especialmente en el área de laboratorios, el problema de la rapidez del cambio tecnológico adquiere especial relevancia y se refiere a lo siguiente: ¿cómo suministrar a los estudiantes experiencias significativas, actualizadas con recursos limitados? El alto costo de los equipos en el laboratorio sigue siendo una limitación. Una solución a este problema es emplear en ellos técnicas de enseñanza y aprendizaje basadas en computadoras personales, en los cuales se reemplacen equipos convencionales por computadoras, instrumentos virtuales y sistemas de adquisición de datos, que permitan a los estudiantes hacer adquisición, procesamiento y control de señales físicas en tiempo real a costos menores. Adicionalmente, los experimentos diseñados bajo este esquema pueden estar disponibles no sólo localmente sino a través de Internet.

Por otro lado, se han desarrollado módulos de enseñanza en el campo de la teoría de los sistemas de control y el control de procesos por computadora respectivamente, utilizando varios softwares, entre ellos *Matriz X* y *Matlab*. Los autores han afirmado que estos módulos permiten a los estudiantes estudiar los distintos aspectos de un tema de la teoría de control o del control de procesos por computadora. El estudiante selecciona el tema usando el ratón, e inmediatamente puede ver el comportamiento del sistema de control. Consideran que estos módulos tienen un alto valor pedagógico, que constituyen un complemento de los libros y de los laboratorios. La opinión del 88% de los estudiantes que tomaron el curso a finales de 1997, fue que estas herramientas de simulación eran un buen complemento de la enseñanza convencional.

Reemplazar los instrumentos tradicionales por instrumentos virtuales que se ejecutan en computadoras, permite que las funciones de los mismos vayan a la par del desarrollo de las nuevas tecnologías de las computadoras, cuyos costos siguen una tendencia decreciente.

Los laboratorios son un elemento clave en la formación integral y actualizada de un ingeniero. No se puede concebir un ingeniero que no haya realizado prácticas de laboratorio en su trayectoria de formación inicial. Los avances tecnológicos de los últimos años han abierto posibilidades para cambiar la estructura rígida de los laboratorios tradicionales, por una estructura flexible que se apoya en las computadoras, circuitos de acondicionamiento, hardware de adquisición de datos y software. Constituyen todos estos elementos la plataforma sobre la cual se desarrolla la instrumentación virtual. Se puede afirmar que, cada año, aumenta el número de universidades que se acogen a esta propuesta de laboratorios virtuales.

La modernización de los laboratorios y de los contenidos que se abordan en ellos ha tenido los siguientes objetivos: favorecer la motivación para la práctica de la electricidad y la electrónica básicas; permitir la verificación de las leyes y conceptos fundamentales; dar oportunidades para la inmediata correlación de resultados teóricos y experimentales; y estimular los grupos de trabajo y su interacción durante las sesiones de laboratorio, desde el montaje de los circuitos hasta la elaboración de los reportes técnicos.

Se ha conseguido aprovechar mejor el tiempo, por la automatización de algunos procedimientos puesto que se pueden analizar los datos experimentales en tiempo real, y rápidamente repetir los pasos si es necesario, y en muchos casos generar un reporte completo inmediatamente.

Para el diseño de las prácticas, lo único que requieren los estudiantes es una PC con tarjeta de adquisición de datos. Los estudiantes realizan el instrumento virtual en sus casas y vienen al laboratorio a verificar el funcionamiento del mismo. El estudiante no sólo se limita a ensamblar un circuito e ir a un laboratorio a tomar medidas: según esta nueva propuesta, debe diseñar el instrumento virtual (software) que le permita obtener las mediciones que realizará en el circuito.

Los cursos de laboratorios en electrónica tienden a ser organizados en una de las dos formas siguientes:

*Énfasis en destrezas de medición.* En estos cursos, el objetivo principal es aprender a hacer ciertas mediciones, tales como respuesta a una función escalón, impedancia o admitancia, función de transferencia vs. frecuencia, etc. Los circuitos en los cuales estas mediciones son realizadas son frecuentemente muy simples; por ejemplo, ellos pueden consistir de componentes lineales, pasivos. La simplicidad de los circuitos puede ser un factor desmotivante para el estudiante, ya que frecuentemente tales circuitos no realizan ninguna función interesante tales como amplificación, oscilación, etc.

*Énfasis en un contenido fundamental de electrónica relacionados con cursos.* Estos cursos de laboratorio están frecuentemente asociados con ciertas materias de teoría en el plan de estudios. El objetivo principal es una comprensión mayor del comportamiento de ciertos circuitos; por ejemplo, la polarización de amplificadores con transistor bipolar de etapa simple, mediante la observación de las propiedades del circuito en el laboratorio. Las necesarias destrezas en medición son introducidas justo en el momento de realizar una medición, tales como la ganancia, y fase versus frecuencia, las cuales confirman las propiedades pronosticadas por el análisis en el curso de teoría.

#### **4.4.2 Instrumentación Electrónica**

Ubicada en el séptimo semestre. Esta asignatura se orienta al diseño de sistemas de medición por medios electrónicos. Como una de las asignaciones principales, los estudiantes deben desarrollar un proyecto en el cual seleccionan el sensor, diseñan su circuito de acondicionamiento, el hardware de adquisición de datos y la

aplicación en la computadora, pueden utilizar el software LabView para realizar la medición y análisis de la señal física, como temperatura, velocidad, presión, nivel, flujo, desplazamiento.

Aquí los estudiantes pueden diseñar instrumentos virtuales en el computador utilizando el software LabView, para desarrollar experiencias con circuitos electrónicos en el laboratorio. Entre ellas se destacan la medición de señales analógicas usando las diferentes técnicas de adquisición de datos, generación de señales analógicas a través del computador, determinación de las constantes de tiempo en un circuito RC, determinación de las curvas características de transistores, etc. Las prácticas propuestas permiten medir y controlar varios procesos existentes usando instrumentos virtuales desarrollados en LabVIEW.

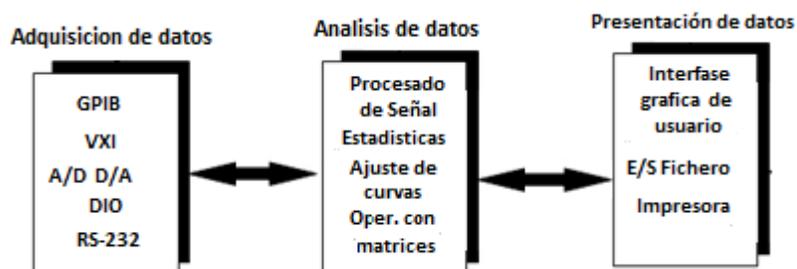
#### 4.4.3 Componentes del instrumento virtual.

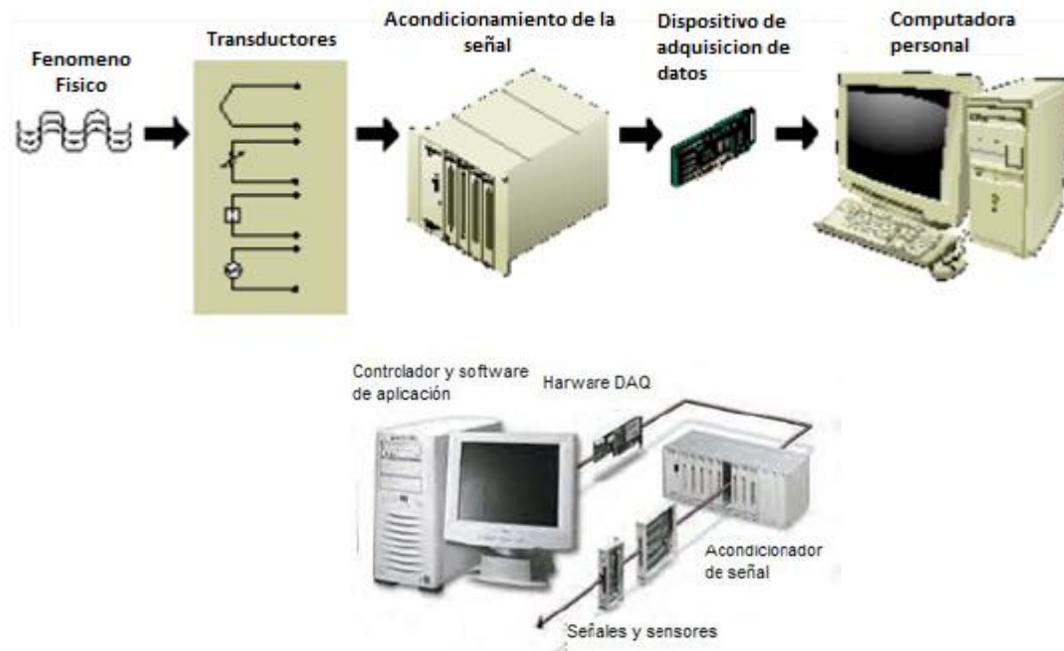
##### 4.4.3.1 Hardware de adquisición de datos.

La adquisición de datos (*data acquisition* o DAQ) es un proceso mediante el cual se miden parámetros físicos reales de variables como voltaje, corriente, temperatura, flujo, nivel, posición, etc. Dicha información se ingresa a la computadora para su posterior análisis y procesamiento con el fin de obtener una salida de información; la cual puede ser almacenada, desplegada en pantalla o enviada a un sitio remoto utilizando algún método de transmisión inalámbrica.

Para realizar el proceso de adquisición de datos se requiere el uso de un sensor o transductor, el cual proporciona señales eléctricas proporcionales a la magnitud física de la variable a medir. Dicho sensor se puede conectar a la computadora utilizando tarjetas electrónicas para adquirir señales, o bien, puede provenir de sitios remotos si la adquisición se realiza mediante dispositivos de conexión inalámbrica tales como Bluetooth, o WiFi. Además, también se pueden tener señales que provengan de puertos o buses de comunicación asociados a la computadora como son el puerto serial, el puerto USB o interfaces PCIX.

En general, la adquisición de datos se puede realizar tanto para ingresar señales a la computadora como para extraer señales de la misma; aunque el término “adquisición” implica solamente adquirir o ingresar datos. El método básico para realizar la manipulación de los datos incluye el uso de tarjetas de adquisición (DAQ boards), las cuales son dispositivos que se encargan de adquirir señales físicas provenientes de los sensores y de generar señales físicas provenientes de datos procesados por la computadora. Las tarjetas de adquisición son la base de la instrumentación virtual, ya que mediante su uso se realiza la comunicación de parámetros físicos del mundo real con la computadora lo cual permite interactuar físicamente con señales tanto virtuales como reales.





**Figura :** El acondicionamiento de señales es un componente importante en un sistema de adquisición de datos.

#### 4.4.3.2 Acondicionamiento de señal.

El uso de las tarjetas de adquisición involucra el uso de convertidores análogo-digital (ADCs) y convertidores digital-análogo (DACs) para la conversión de las señales de analógica a digital y de digital a analógica, respectivamente, ya que las señales procesadas por la computadora son señales digitales y se requiere del proceso de conversión. Además, se tienen procesos de acondicionamiento de las señales para su manipulación correcta, los cuales involucran métodos de amplificación, filtrado, aislamiento y/o linealización para evitar efectos negativos como el ruido, sobrecargas, *aliasing*, no linealidad y otros. Lo anterior indica que el uso correcto de las tarjetas de adquisición conlleva la aplicación de conocimientos en diferentes áreas de ingeniería, la cual representa una herramienta poderosa para el diseño y desarrollo de aplicaciones relacionadas con la instrumentación virtual.



#### 4.4.3.3 Software de programación y control.

El software es la clave en los instrumentos virtuales; ofrece al usuario las herramientas necesarias para construir instrumentos virtuales y expandir su funcionalidad ofreciendo una conectividad con las enormes posibilidades de los PC. Esta flexibilidad que permite el software puede, sin embargo, llevar un costo asociado

mayor que el del instrumento tradicional. Si el usuario no dispone de las herramientas adecuadas de programación para el desarrollo de la aplicación, las horas invertidas en la realización de los programas encarecerán el valor real del instrumento final.

Hoy en día se tienen varios lenguajes de programación los cuales pueden utilizarse para desarrollar aplicaciones de instrumentación virtual en diferentes áreas de estudio. Estos lenguajes tienen en común el hecho de que se basan en conjuntos de instrucciones de texto creando líneas de código. Como ejemplos de estos lenguajes se tienen: C/C++, C#, Java, Python, por mencionar los más utilizados. Dichos lenguajes ofrecen diferentes ventajas y desventajas entre sí, las cuales permiten el desarrollo de interfaces virtuales aplicables a la instrumentación.

Sin embargo, la instrumentación virtual se basa en la interacción del usuario con interfaces computacionales gráficas para el control y monitoreo de sistemas físicos, por lo cual los lenguajes gráficos ofrecen mayores ventajas respecto a los lenguajes tradicionales basados en texto. El lenguaje gráfico —también llamado lenguaje G— más utilizado para desarrollar aplicaciones de instrumentación virtual es el LabVIEW® (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) desarrollado por la empresa National Instruments en 1986, el cual elimina múltiples detalles sintácticos asociados con los lenguajes basados en texto, ya que se trata de un modelo de programación gráfica con el cual se tienen diferentes ventajas en relación a los lenguajes mencionados anteriormente. Por esta razón, se ha constituido, en la actualidad, como el estándar para aplicaciones de instrumentación virtual.

Los códigos gráficos incluyen una interfaz de usuario completamente gráfica y un código fuente basado en el uso de bloques de conexión interconectados mediante cables. La creación de los lenguajes de programación gráfica, y su inherente evolución, ha permitido el desarrollo de múltiples protocolos e interfaces de comunicación creados con el objetivo de abarcar una amplia gama de aplicaciones industriales programables en lenguaje gráfico, lo cual ha constituido la base de la instrumentación virtual.

#### 4.4.3.4 Buses y protocolos de comunicación en instrumentación virtual.

En la actualidad existen diferentes protocolos de comunicación utilizados para transmitir y recibir datos de múltiples dispositivos. En el ámbito de la instrumentación virtual se encuentra un conjunto de protocolos e interfaces de comunicación aplicables a la transferencia de datos entre la computadora con la aplicación virtual ejecutándose y los periféricos externos. Los más utilizados incluyen: RS232, RS485, GPIB, PXI, VXI, *CompactDAQ*, *CompactRIO*, *Compact Field Point* y redes inalámbricas de Sensores.

#### 4.4.4 Ventajas de la instrumentación virtual frente a la instrumentación tradicional.

<b>Instrumento tradicional:</b>	<b>Instrumento virtual:</b>
Definido por el fabricante	Definido por el usuario
Funcionalidad específica, con conectividad limitada.	Funcionalidad ilimitada, orientado a aplicaciones, conectividad amplia.
Hardware es la clave.	Software es la clave
Alto costo / función	Bajo costo / función, variedad de funciones, reusable.
Arquitectura “cerrada”	Arquitectura “abierta”.
Lenta incorporación de nuevas tecnologías.	Rápida incorporación de nuevas tecnologías, gracias a la plataforma PC.
Bajas economías de escala, alto costo de mantenimiento.	Altas economías de escala, bajos costos de mantenimiento.

#### **4.4.5 Resumen:**

Los instrumentos virtuales son instrumentos “reales” en el sentido de que son capaces de adquirir y procesar datos originados a partir de un fenómeno físico producido en el mundo real. Estos instrumentos son “virtuales” en el sentido de que algunos aspectos de su operación son implementados por software.

La clave del sistema virtual es el software para el manejo y control de los instrumentos de prueba, medición, procesamiento de datos y señales. En un instrumento virtual es el usuario quien, a través del software, define su funcionalidad y “apariencia” y por ello decimos que “virtualizamos” el instrumento, ya que su funcionalidad puede ser definida una y otra vez por el usuario y no por el fabricante.

- a.** Esto contribuye a una mejor comprensión de los conceptos estudiados y a mejorar su preparación profesional con miras a las demandas del mundo del trabajo, ya que estas tecnologías cada vez son más empleadas en las industrias o empresas.
- b.** Permite disminuir los costos de los laboratorios al reemplazar equipos costosos por instrumentos virtuales que se ejecutan en una PC. Se resuelve así el problema de la obsolescencia de los equipos existentes y posibilita mantener al día a los laboratorios con los avances de las nuevas tecnologías.
- c.** Proporciona flexibilidad a los profesores para diseñar experimentos que se ajusten a los contenidos de aprendizaje, permitiendo el desarrollo de estrategias de enseñanza basadas en habilidades y destrezas, solución de problemas, estudio de casos, aprendizaje colaborativo, etc.
- d.** La sencillez conceptual de la programación gráfica facilita su comprensión por parte de los estudiantes, permitiéndoles concentrarse en los conceptos y no perder tiempo en arduas tareas de programación, recolección de datos, etc.

## Contenido

Unidad IV .....	219
Instrumentos especiales y virtuales .....	219
4.1 Analizador de estados lógicos. ....	219
4.1.1 El Analizador Lógico.....	219
4.1.2 Modos de muestreo en analizadores lógicos. ....	222
4.1.3 Sistema de disparo. ....	223
4.1.4 Adquisición de datos. ....	225
4.1.5 Sondas y puntas de prueba. ....	226
4.2 Analizador lógico USB-LOGI-500.....	226
4.3 El osciloscopio registrador-analizador lógico 1190 de PeakTech. ....	227
4.4 Analizador lógico del programa Multisim.....	228
4.2 El Analizador de Espectro. ....	233
4.2.1 Características de la corriente alterna sinusoidal.....	233
4.2.2 Visualización de señales en el dominio del tiempo. ....	234
4.2.2.1 Defasamiento $\varphi$ de una señal eléctrica con respecto a otra.....	234
4.2.3 Análisis armónico. Ondas complejas. ....	235
4.2.4 Algunos conceptos básicos en sistemas de comunicación.....	238
4.2.5 El espectro de ondas electromagnéticas.....	240
4.2.2 Visualización de señales en el dominio de la frecuencia. ....	241
4.2.2.1 Introducción al analizador de espectro .....	241
4.2.2.2 El analizador de espectro y los diferentes tipos disponibles .....	242
4.2.2.3 Analizadores espectrales híbridos. ....	244
4.2.2.3.1 Analizador de barrido superheterodino .....	244
4.2.2.4 El analizador de espectro (Spectrum Analyzer) en el Software Multisim. ....	246
4.2.2.4.1 Ejemplos de aplicación del programa MULTISIM. ....	249
Ejemplo 1.....	249
Ejemplo 2.....	250
Ejemplo 3.....	250
Ejemplo 4. Análisis de la onda cuadrada con Multisim. ....	251
Ejemplo 5. Señales de RF moduladas .....	252
4.3 Equipos especiales de medición .....	254
4.3.1 Graficadores-registradores.....	254
4.3.1.1 Importancia de la representación gráfica de datos experimentales .....	255
4.3.1.2 Graficadores-registradores de cinta. ....	257
4.3.1.2.1 El reloj de agua de Ktsibios (300 años A.C.).....	258
4.3.1.2.2 El sismógrafo. ....	258

4.3.1.2.3 El termohigrógrafo .....	259
4.3.1.2.3.1 Características del instrumento.....	259
4.3.1.3 Graficadores-registradores circulares. ....	260
4.3.1.4 Graficadores-registradores sin papel. ....	260
4.3.1.4.1 Graficador digital sin papel LBVR1706.....	261
4.3.2 El trazador de curvas .....	262
4.3.2.1 El trazador de curvas HM6042 .....	263
4.3.2.1.1 Mandos de Control.....	264
4.3.2.1.1 Indicaciones de funcionamiento. ....	265
4.3.2.1.2 Conexión de los componentes .....	266
4.3.2.1.3 Elección del tipo de componente. ....	266
4.3.2.1.4 Presentación del conjunto de curvas. ....	266
4.3.2.1.5 Elección de los parámetros .....	268
4.3.2.1.6 Utilización de las funciones de memoria MEM .....	269
4.3.2.1.7 Ejemplos de aplicación. Transistores bipolares .....	269
4.3.2.1.8 Presentación de las curvas características para transistores de efecto de campo .....	269
4.3.2.2 Uso del Analizador IV del programa MULTISIM como trazador de curvas.....	269
4.3.2.2.1 Cuadro de diálogo Simulate Parameters. ....	271
4.3.2.2.2 Parámetros de diodos. ....	271
4.3.2.2.3 Parámetros del BJT PNP .....	272
4.3.2.2.4 Parámetros del FET PMOS.....	274
4.3.2.2.5 Parámetros FET NMOS .....	274
4.3.2.2.6 Revisión de Datos del Analizador I-V. ....	275
4.3.3 El luxómetro. ....	279
4.3.3.1 Conceptos básicos de iluminación.....	279
4.3.3.1.1 Intensidad luminosa. ....	280
4.3.3.1.2 Definición de esterradián. ....	281
4.3.3.1.3 Flujo luminoso, $\Phi$ .....	282
4.3.3.1.4 El flujo luminoso como la cantidad de líneas de luz (rayos) que incide sobre una superficie. ....	282
4.3.3.1.5 Iluminación o iluminancia:.....	282
4.3.3.1.6 Ley inversa de los cuadrados.....	283
4.3.3.1.7 Luminancia: .....	283
4.3.3.1.8 Rendimiento luminoso. ....	284
4.3.3.1.9 Visibilidad. ....	285
4.3.3.1.10 Características de la visión humana .....	285
4.3.3.1.11 Percepción visual.....	286
4.3.3.2 Funcionamiento del luxómetro .....	287
4.3.3.3 El luxómetro Extech 401025.....	288

4.3.3.3.1 Características importantes:.....	288
4.3.3.3.2 Descripción del Panel Frontal .....	289
4.3.3.3.3 Operación. ....	289
4.3.3.3.4 Selección de Escala .....	290
4.3.3.3.5 Procedimiento a cero .....	290
4.3.3.3.6 Salida análoga.....	291
4.3.3.4 Luxómetro con función de conexión a una computadora.....	291
4.3.3.4.1 Características .....	291
4.3.3.4.2 Descripción del medidor.....	292
4.3.3.4.3 Descripción de la pantalla.....	292
4.3.3.4.4 Operación .....	293
4.3.3.4.4.1 Unidad de medida .....	293
4.3.3.4.4.2 Selección de escala .....	293
4.3.3.4.4.3 Toma de medidas .....	293
4.3.3.4.4.4 Retención de datos.....	293
4.3.3.4.4.5 Retención de picos .....	293
4.3.3.4.4.6 Lectura máxima (MAX) y mínima (MIN) Memoria .....	293
4.3.3.4.4.7 Modo relativo .....	293
4.3.3.4.4.8 Retroiluminación LCD .....	294
4.3.3.5 Conexión USB para PC .....	294
4.3.3.5.1 Descripción .....	294
4.3.3.5.2 Especificaciones de escala .....	294
4.3.4. Tacómetro. ....	295
4.3.4.1 Diferencias entre un tacómetro analógico y un tacómetro digital: .....	295
4.3.4.2 Tacómetro centrífugo.....	296
4.3.4.3 Los tacómetros eléctricos.....	296
4.3.4.4 Tacómetro de corrientes Foucault .....	296
4.3.4.5 Tacómetros por conteo de pulsos .....	297
4.3.4.6 Generación por inducción magnética.....	297
4.3.4.7 Generación óptica .....	298
4.3.5 Medidores de campo magnético .....	299
4.3.5.1 Factores del campo EM al que se está expuesto.....	299
4.3.5.1.1 Efectos .....	300
4.3.5.2 Concepto de campo magnético. ....	300
4.3.5.2.1 Los imanes. ....	300
4.3.5.2.2 Líneas de campo magnético, flujo magnético e intensidad de campo magnético.....	301
4.3.5.2.3 Magnetismo terrestre. ....	301
4.3.5.2.4 La brújula. El primer magnetómetro. ....	302

4.3.5.2.5 Descubrimiento del electromagnetismo. ....	302
4.3.5.2.6 Ley de Ampère. ....	303
4.3.5.2.7 Campo magnético creado por un solenoide: .....	304
4.3.5.2.8 Ley de Faraday.....	304
4.3.5.2.9 Fuerza electromotriz inducida por la variación de la intensidad del campo magnético. ....	305
4.3.5.2.10 Principio del generador de corriente eléctrica. ....	305
4.3.5.3 Medidores de campo.....	306
4.3.5.4 Información sobre los campos electromagnéticos.....	307
4.3.5.5 El Teslámetro PCE-G28 .....	307
4.3.5.5.1 Características principales. ....	308
4.3.5.5.2 Ejemplo de utilización del teslametro PCE-G28.....	308
4.3.5.6 Variación del campo magnético con la distancia.....	308
4.3.6 Analizador de Fourier. ....	309
4.3.6.1 Conceptos básicos. ....	309
4.3.6.2 La serie de Fourier de una onda cuadrada. ....	310
4.3.6.3 Descomposición espectral de otras formas de onda: .....	312
4.3.6.4 Análisis de Fourier en el programa Multisim.....	313
4.3.6.5 Configuración de los parámetros de análisis de Fourier para uso normal .....	315
4.4 Introducción al manejo de instrumentos virtuales.....	317
4.4.1 Evolución de la instrumentación. ....	317
4.4.2 Instrumentación Electrónica .....	319
4.4.3 Componentes del instrumento virtual. ....	320
4.4.3.1 Hardware de adquisición de datos. ....	320
4.4.3.2 Acondicionamiento de señal. ....	321
4.4.3.3 Software de programación y control.....	321
4.4.3.4 Buses y protocolos de comunicación en instrumentación virtual.....	322
4.4.4 Ventajas de la instrumentación virtual frente a la instrumentación tradicional.....	322
4.4.5 Resumen:.....	323

## Unidad 5<sup>1</sup>

### Diseño y elaboración de tarjetas de circuitos impresos.

El conocimiento sólo puede lograrse de una manera:  
a través de la experiencia, no hay otra.

- 5.1. Introducción a los circuitos impresos.
- 5.2. Diseño de PCB mediante software.
- 5.3. Técnicas básicas para la construcción de circuitos impresos.

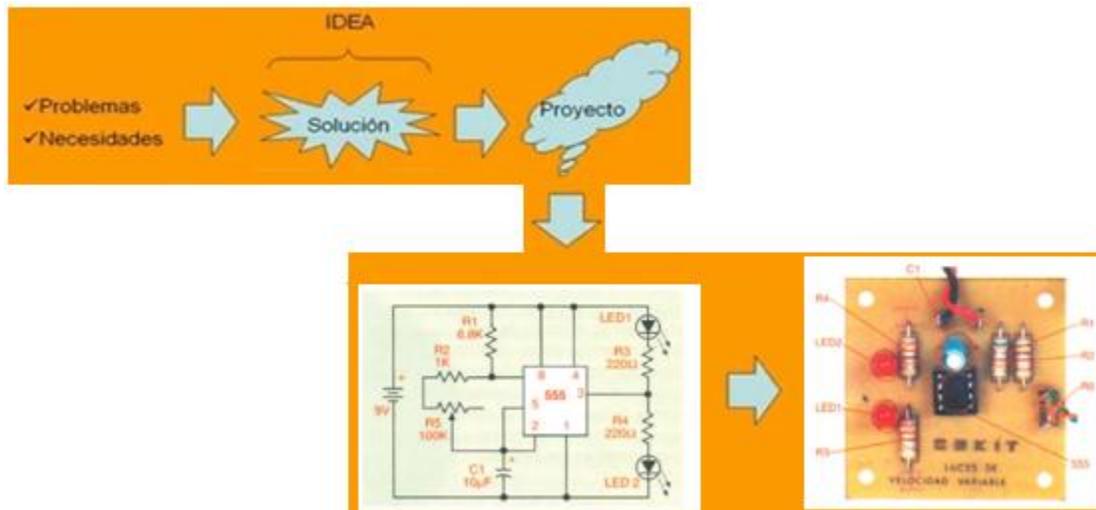
#### 5.1. Introducción a los circuitos impresos.

Una de las actividades constantes que se deben realizar con referencia al aprendizaje de la electrónica es la implementación de diversos proyectos. Como consecuencia, es necesario realizar de forma práctica circuitos diseñados que inicialmente se expresan en forma simbólica en diagramas electrónicos. Para la elaboración física de un proyecto electrónico, generalmente se pueden seguir los pasos:

- a) Diseño del proyecto.
- b) Elección o diseño del circuito.
- c) Consecución de los componentes.
- d) Ensayo en protoboard.
- e) Diseño y elaboración de circuito impreso (PCB).
- f) Ensamble del circuito.
- g) Pruebas y corrección de fallas.

##### 5.1.1. Diseño del proyecto.

Un proyecto electrónico puede surgir debido a dos situaciones: la primera, generada por la curiosidad y la investigación sobre cierto tema teórico que se estudia, y la segunda, por la solicitud de solventar necesidades industriales, sociales o personales, que requerirán la construcción de circuitos electrónicos específicos.



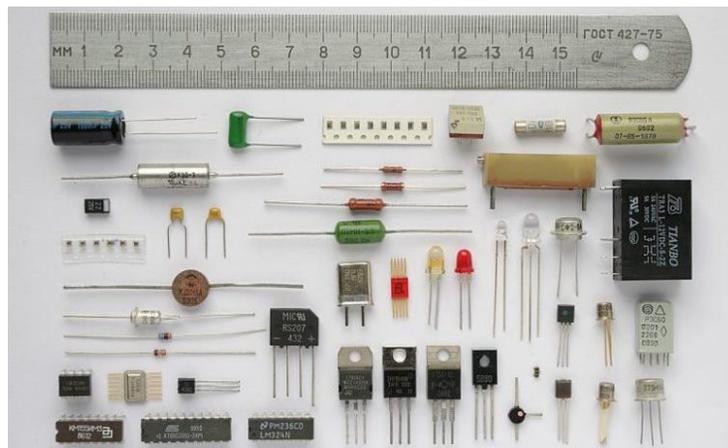
<sup>1</sup> Apegado al programa de la asignatura actualizado, según CIRCULAR No. M00.2.1/014/2016 del Tec.N.M. 06/06/ 2016.

### 5.1.2. Elección o diseño del circuito.

Una vez que el proyecto se ha desarrollado y formalmente concluido, se procede a diseñar el circuito (o los circuitos) electrónicos que se requieren en el proyecto. Generalmente, los proyectos planteados al inicio del aprendizaje de la carrera de ingeniería electrónica son aquellos que sirven para la verificación de alguna teoría sobre temas fundamentales de la electrónica. Por ejemplo, para estudiar la rectificación de c.a., se **eligen** circuitos tales como fuentes de poder. Para circuitos analógicos, pequeños amplificadores con transistores y circuitos integrados. Para electrónica digital, circuitos digitales simples, temporizadores, etc. Posteriormente surgirán otros proyectos con la finalidad de ser aplicados a la solución de diversos problemas más específicos, donde se presenta la necesidad de **diseñar** los circuitos propios del problema planteado.

### 5.1.3. Consecución de materiales.

Una vez que ya se tiene definido el circuito a utilizar, debemos conseguir los componentes necesarios para realizarlo. Estos se pueden obtener personalmente (o virtualmente) en los negocios especializados para la venta de ellos. Es muy conveniente, asegurar que se cuenta con todos los componentes o de tener el replazo para los que no se encuentren originalmente. De esta manera se evita comprar la mayoría de componentes y al final encontrar que falta uno que no permite que se termine el proyecto.



Un recurso muy importante con que se debe contar, que complementa la presencia física de los componentes, son las hojas de datos (o, datasheet). Son documentos electrónicos que resumen el funcionamiento y otras características físicas de un componente electrónico o un subsistema (por ejemplo, una fuente de alimentación, un contador digital, etc.) con el suficiente detalle para ser utilizados por quienes diseñan o implementan circuitos PCB.

**1N4001, 1N4002, 1N4003, 1N4004, 1N4005, 1N4006, 1N4007**

**Axial Lead Standard Recovery Rectifiers**

This data sheet provides information on subminiature size, axial lead mounted rectifiers for general-purpose low-power applications.

**Features**

- Shipped in Plastic Bags, 1000 per bag
- Available Tape and Reeled, 5000 per reel, by adding a "RL" suffix to the part number
- Available in Fan-Fold Packaging, 3000 per box, by adding a "FF" suffix to the part number
- Pin-Trim Packages are available

**Mechanical Characteristics**

- Case: Epoxy Moulded
- Weight: 0.4 gram (approximate)
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Ready Solderable
- Lead and Mounting Surface Temperature for Soldering Purposes: 340°C Max. for 10 Seconds, 1.54 in. from case
- Polarity: Cathode Indicated by Polarity Band

**ON Semiconductor**  
http://onsemi.com

**LEAD MOUNTED RECTIFIERS**  
50-1000 VOLTS  
DIFFUSED JUNCTION

**MARKING DIAGRAM**

A = Assembly Location  
1N400 = Device Number  
1 = U.S.A. S. 1st  
0V = Year  
WW = 2 Pin Package  
(Note: Model may be in either location)

**ORDERING INFORMATION**  
See related ordering and shipping information on page 1 of this data sheet.

**1N4001, 1N4002, 1N4003, 1N4004, 1N4005, 1N4006, 1N4007**

**PACKAGE DIMENSIONS**

**AXIAL LEAD**  
CASE 95-10  
ISSUE U

**NOTES:**

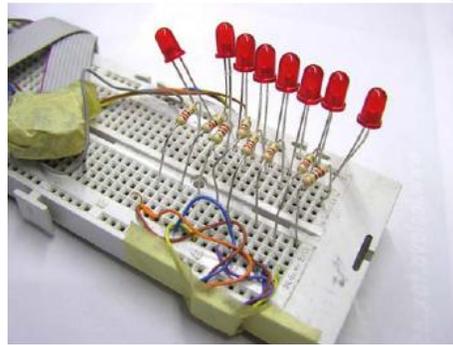
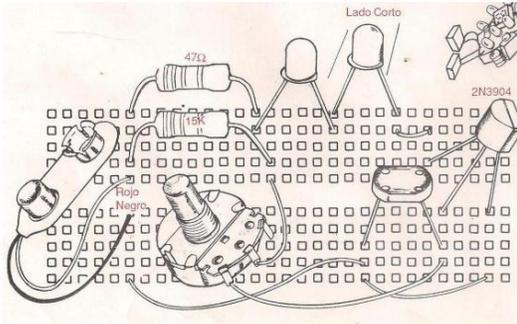
1. DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ANSI Y14.5M, 1995.
2. CONTROLLING DIMENSIONS INCH.
3. ALL HOLE AND HOLE TO HOLE DIMENSIONS ASSOCIATED WITH JEDEC DO-41 OUTLINE SHALL APPLY.
4. POLARITY INDICATED BY CATHODE BAND.
5. LEAD DIMENSIONS NOT CONTROLLED WITHIN P DIMENSION.

	DIMENSIONS		MIN. MAX.	
A	0.175	0.200	0.175	0.200
B	0.250	0.275	0.250	0.275
C	0.010	0.015	0.010	0.015
D	0.010	0.015	0.010	0.015
E	0.010	0.015	0.010	0.015
F	0.010	0.015	0.010	0.015
G	0.010	0.015	0.010	0.015
H	0.010	0.015	0.010	0.015
I	0.010	0.015	0.010	0.015
J	0.010	0.015	0.010	0.015
K	0.010	0.015	0.010	0.015
L	0.010	0.015	0.010	0.015
M	0.010	0.015	0.010	0.015
N	0.010	0.015	0.010	0.015
O	0.010	0.015	0.010	0.015
P	0.010	0.015	0.010	0.015
Q	0.010	0.015	0.010	0.015
R	0.010	0.015	0.010	0.015
S	0.010	0.015	0.010	0.015
T	0.010	0.015	0.010	0.015
U	0.010	0.015	0.010	0.015
V	0.010	0.015	0.010	0.015
W	0.010	0.015	0.010	0.015
X	0.010	0.015	0.010	0.015
Y	0.010	0.015	0.010	0.015
Z	0.010	0.015	0.010	0.015

Los componentes como los transistores se pueden reemplazar generalmente por otro similar. Con este fin se ha establecido sistemas de reemplazos como el ECG<sup>2</sup>, que es un manual muy completo y que está disponible en casi todos los almacenes de suministro de componentes.

#### 5.1.4. Ensayo en protoboard.

Es necesario mencionar que este paso del desarrollo del proyecto evita pérdida de tiempo y de dinero. Es conveniente armar el circuito en el protoboard con el fin de asegurarnos que el diagrama escogido funciona correctamente y que los componentes están en buen estado..



Placa prototipo.

Después de haber diseñado el circuito en papel es imprescindible comprobar si su funcionamiento es como se esperaba. Al igual que en cualquier otro proceso de fabricación, cuanto antes se detecten los problemas menos cuesta solucionarlos; por ese motivo es muy conveniente realizar las pruebas antes de completar el montaje definitivo, para evitar gastar en una placa de circuito impreso (PCB), componentes, e invertir más tiempo del necesario. En ciertos casos se pueden realizar algunas pruebas incluso antes de diseñar el circuito, por ejemplo para probar por separado cada componente de los que se esperan utilizar. Una vez confirmado el buen funcionamiento del proyecto, procedemos al diseño y fabricación del circuito impreso

#### 5.1.5. Diseño y elaboración del circuito impreso (PCB).

Este es el tema central de la Unidad V, por lo que se hará su presentación y explicación con un poco de más detalle que los otros puntos que integran este bloque. Se empezará desde los conceptos más básicos hasta que se tengan los elementos necesarios para poder construir una PCB con el apoyo de software o programas computacionales.

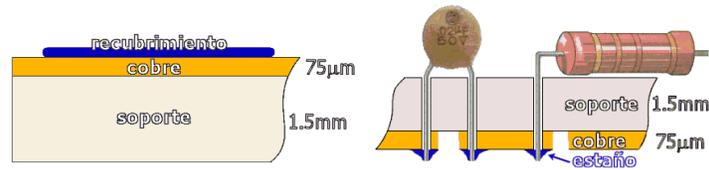
##### 5.1.5.1. Descripción de la placa de cobre para PCB.

La placa de cobre donde se hará el circuito impreso (del inglés: *Printed Circuit Board*, PCB), ha sido uno de los descubrimientos que más ha contribuido al desarrollo de la electrónica facilitando la experimentación y especialmente agilizando el proceso de producción de una manera estable. Esencialmente es una superficie constituida por pistas o buses de material conductor (generalmente de cobre) laminadas sobre una base firme no conductora.

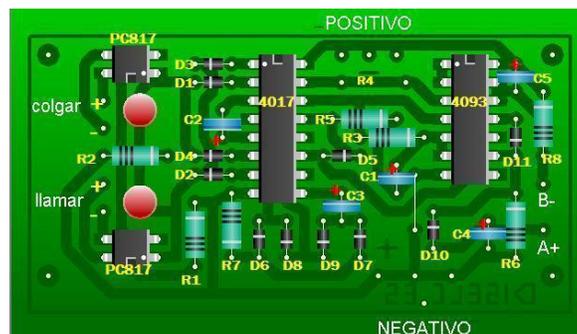
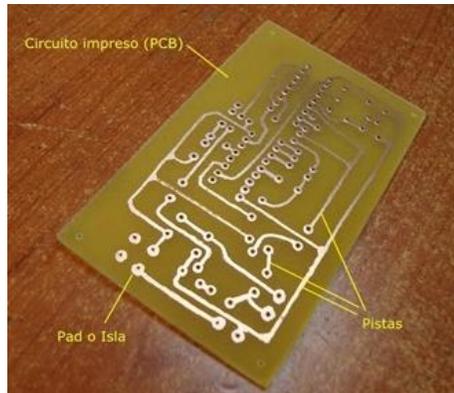
Esta base o soporte puede ser generalmente de resinas de fibra de vidrio reforzada, pero también cerámica, plástico, teflón o polímeros como la baquelita<sup>3</sup>) y una capa de cobre depositada sobre el soporte, tal como se observa aquí:

<sup>2</sup> <http://proyctoselectronics.blogspot.com/2008/08/como-usar-un-manual-nte.html>

<sup>3</sup> La **resina fenólica** es una resina sintética termoestable (polímeros infusibles e insolubles), obtenida como producto de la reacción de los fenoles con el formaldehído. Las resinas fenólicas se utilizan principalmente en la producción de la *baquelita*, el más antiguo material industrial de polímeros sintéticos.



La placa de cobre para circuito impreso se utiliza para conectar eléctricamente un conjunto de componentes electrónicos a través de *pistas* (routes, en inglés) conductoras construidas sobre la superficie de cobre, y además, sostenerlos mecánicamente, por medio de la base. Así, cada trazo o línea se denomina *pista*, la cual puede ser vista como un cable que une dos o más puntos del circuito. Cada círculo o cuadrado con un orificio central donde el terminal de un componente será insertado y soldado se denomina isla (*pad*, en inglés).



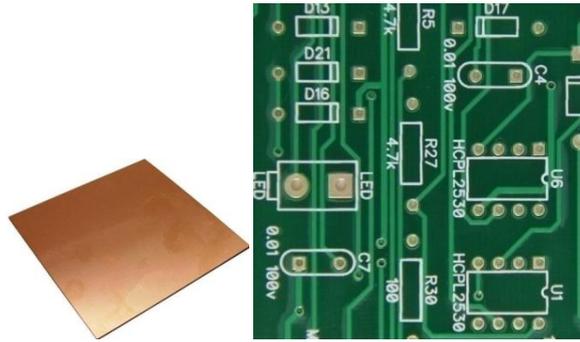
a) La placa de Circuito Impreso. b) Se ven las líneas conductoras (los caminos), las islas y algunos componentes montados. c) Circuito impreso terminado.

El circuito impreso cumple doble función: se usa para interconectar los componentes del circuito y para sostenerlos físicamente de una manera estable. Existen circuitos impresos de una cara, de una doble cara y capas múltiples.

Una de las ventajas del circuito impreso es que ha reemplazado totalmente el sistema convencional de cableado, que permite mayor rapidez en el armado de aparatos en serie, presenta menos posibilidades de error, da una mejor apariencia al proyecto, ahorra espacio, y es resistente a las vibraciones.

Para empezar a construir la PCB tenemos que decidir qué material se va a ocupar. Si se trata de un circuito donde habrá señales de radio o de alta frecuencia se usará una placa virgen de pertinax, que es un material poco alterable por la humedad. De lo contrario, para la mayoría de las aplicaciones, con placa de material fenólico es suficiente.

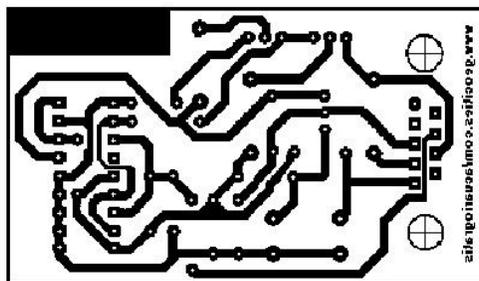
Cuando se compra la placa de circuito impreso virgen ésta se encuentra recubierta completamente con una lámina de cobre, por lo que, para formar las pistas e islas del circuito habrá que eliminar las partes de cobre que no son necesarias.



Además de pistas e islas sobre un circuito impreso se pueden escribir leyendas o dibujar los símbolos de cada elemento. Esto es útil, por ejemplo, para señalar qué terminal es positivo, hacia dónde se inserta un determinado componente o incluso como marca de referencia del fabricante.

### 5.1.5.2. Técnicas para el diseño del fotolito para circuitos impresos.

Hay muchas formas de diseño y fabricación de los circuitos impresos. Para empezar una PCB debe diseñarse el *fotolito*<sup>4</sup> del circuito. Existen diferentes formas de obtener el *fotolito* del circuito. A este panorama múltiple, debe agregarse que también hay otras tantas formas de grabar el fotolito a la placa. También se tienen técnicas diferentes para atacar al cobre para que se formen las pistas. En fin, tratar de cubrir completamente este tema es difícil, resulta demasiado amplio. Por lo tanto, para este documento, se hará la descripción de lo más esencial. Para empezar, diremos que tenemos dos formas de lograr el fotolito: a) grabado directo a la placa con marcador de tinta permanente, y b) con ayuda de cualquier de los programas de computadora que son específicos a esta tarea, como son el OrCad, el Multisim (Ultiboard), el Livewire (PCB Wizard), Proteus (Ares), KiCad, Eagle, etc. También se puede disponer de una herramienta disponible a través de una página web, su nombre es EasyEDA.



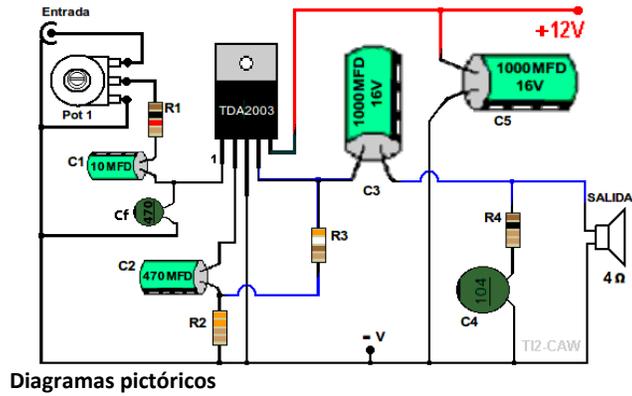
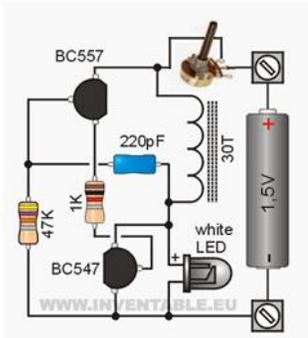
Fotolito de un circuito

### 5.1.5.3. Técnica de grabado directo a la placa con marcador de tinta permanente.

Aunque esta técnica no usa ningún software, se incluye en este tema como modelo didáctico, de tal manera que el alumno pueda visualizar un procedimiento que se repetirá cuando se use la ayuda de la computadora. Esta técnica puede usarse en trabajos de mediana complejidad y que, además no se requiera alta calidad de impresión. Con esta técnica el circuito a construir se dibuja directamente en la placa del PCB.

Esencialmente el método es el siguiente: Una vez que tenemos diseñado el circuito en papel, lo que tenemos que hacer es redibujar el circuito ubicando y distribuyendo los componentes del circuito, y con ayuda de determinado material de dibujo, como una regla, lápices y bolígrafos de colores, recrear el circuito que constituyan las interconexiones.

<sup>4</sup> El fotolito es una imagen opaca impresa o dibujada sobre un papel couche (el papel couché es el que se usa en las revistas, hay de diferentes calibres y lo hay mate y brillante, por un lado o por ambos); es la imagen que queremos traspasar a la placa de cobre y por lo tanto, de ella depende la calidad de lo que vayamos a imprimir.



Diagramas pictóricos

Posteriormente con ayuda de un punzón y un rotulador de tinta indeleble se irá marcando sobre la placa puntos de conexión y las pistas que protegerán con tinta al cobre de la corrosión posterior a la que será sometida la placa.

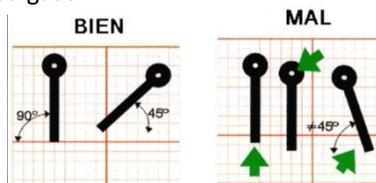
Antes de iniciar la explicación de este método, que se realiza sin software, vamos a dar a conocer ciertas normas y recomendaciones básicas que ayudarán a lograr nuestros objetivos de diseño en la mejor forma.

#### 5.1.5.4 Recomendaciones:

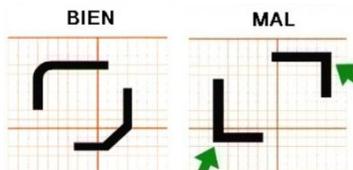
1. Se trata de realizar un diseño de PCB lo más sencillo posible; cuanto más cortas sean las pistas y más simple la distribución de componentes, mejor resultará el diseño.
2. Los "pads" son puntos de soldadura en círculos cuyo diámetro deberá ser, al menos, el doble del ancho de la pista que en él termina.
3. El ancho de las pistas dependerá de la intensidad de corriente que vaya a circular por ellas. Se tendrá en cuenta que 0.8 mm puede soportar, dependiendo del espesor de la pista, alrededor de 2 amperios; 2 mm, unos 5 amperios; y 4,5 mm, unos 10 amperios. En general, se realizarán pistas de unos 2 mm aproximadamente.

#### 5.1.5.5 Normas

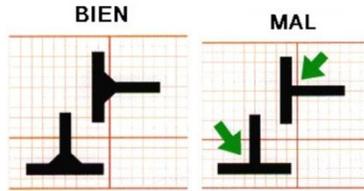
1. Se diseñará sobre hoja cuadrículada, de modo que se hagan coincidir las pistas con las líneas de la cuadrícula o formando un ángulo de 45° con éstas, y los puntos de soldadura con las intersecciones de las líneas. La cuadrícula puede ser milimétrica o en decimas de pulgada.



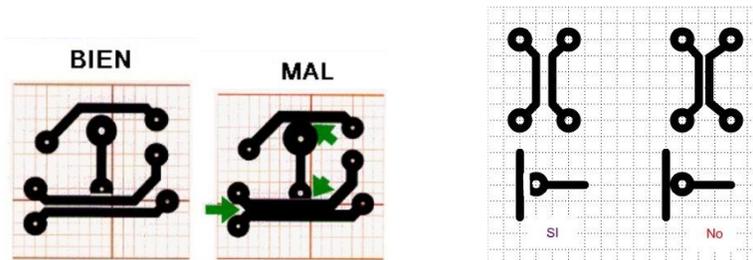
2. No deben trazarse pistas con ángulos de 90°; cuando sea preciso efectuar un giro en una pista, se hará con dos ángulos de 135°.



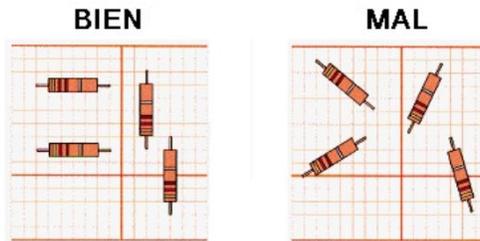
3. Si es necesario ejecutar una bifurcación en una pista, se hará suavizando los ángulos con sendos triángulos a cada lado.



4. Entre pistas próximas y entre pistas y puntos de soldadura, se observará una distancia (*clearance*, en inglés) que dependerá de la tensión eléctrica que se prevea existirá entre ellas: como norma general, se dejará una distancia mínima de unos 0.8 mm. En casos de diseños complejos, se podrá disminuir los 0.8 mm hasta 0.4 mm. En algunas ocasiones será preciso cortar una porción de ciertos puntos de soldadura para que se cumpla esta norma.

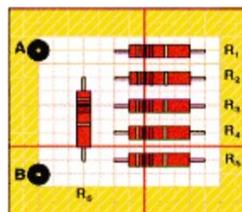


5. Todos los componentes se colocarán paralelos a los bordes de la placa.

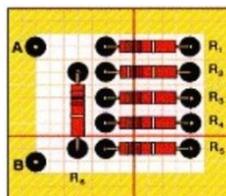


6. La disposición de los componentes

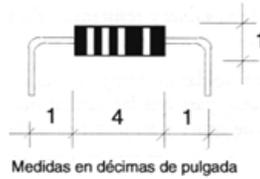
Se colocan los componentes de forma que resulte un circuito lo más sencillo posible, siempre respetando las normas.



Se dibujan los círculos correspondientes a los puntos de soldadura (o islas).



7. Se debe dejar, una o dos décimas de pulgada de patilla entre el cuerpo de los componentes y el punto de soldadura correspondiente.



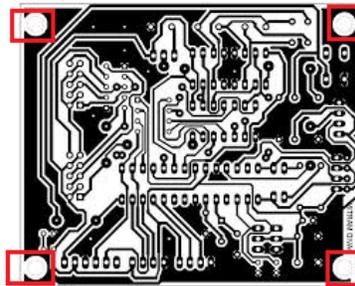
8. La distancia mínima entre las pistas y los bordes de la placa será de dos décimas de pulgada, aproximadamente unos 5 mm.



9. No se podrán colocar pistas entre los bordes de la placa y los puntos de soldadura de terminales de entrada, salida o alimentación, exceptuando la pista de masa.

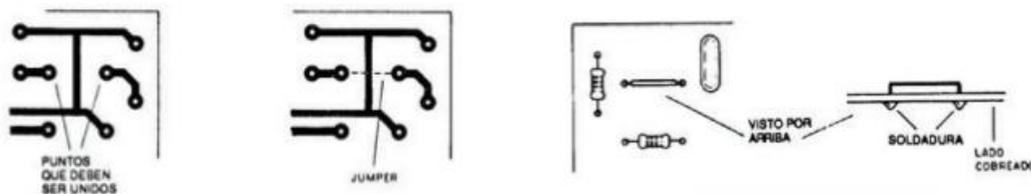
10. No se pasarán pistas entre dos terminales de componentes activos (transistores, tiristores, etc.).

11. Se debe prever la sujeción de la placa a un chasis o caja; para ello se dispondrá un taladro de 3.5 mm en cada esquina de la placa.

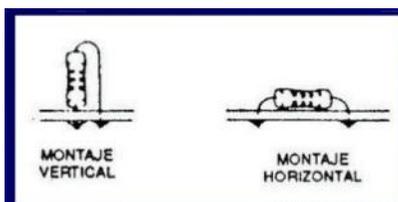


### 5.1.5.6 Recursos Especiales... El Jumper (o puente).

Suponga que, en un proyecto, un componente debe tener un terminal conectado a otro, pero entre ellos pasa una pista de cobre. Para no cruzarse, ¿qué hacer? La solución puede estar en una especie de “puente”. Un trozo de cable, pasado por encima de la placa, o sea, del lado de los componentes, interconecta los dos lados de la pista que “molesta” y el problema está resuelto



La disposición de los componentes.



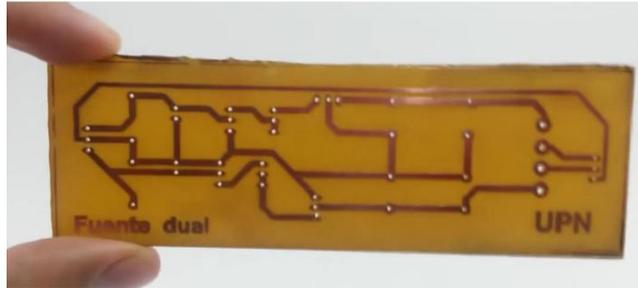
Componentes con terminales axiales.



Componentes con terminales paralelos.

### 5.1.6. Ensamble de componentes.

Cuando la placa PCB ya ha pasado por todo el proceso de impresión del fotolito, trabajada ya, con todas las perforaciones necesarias, empezaremos la última etapa de su proceso de fabricación, que es el ensamblaje de sus componentes físicos.



### 5.1.7. Pruebas y corrección de fallas del PCB.

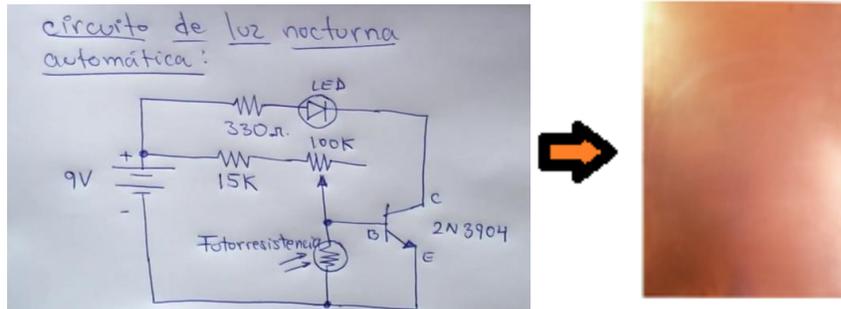
Esta etapa es la conclusión del proyecto que se ha venido trabajando. En sí, es una evaluación final de todo el esfuerzo aplicado a la construcción del PCB. Si se ha seguido con cuidado los lineamientos indicados en estas notas, se puede tener la confianza que con los resultados obtenidos se logrará el cabal cumplimiento de los objetivos del proyecto.

No obstante, si nuestro circuito no lograra funcionar satisfactoriamente, deberá hacerse la localización de la falla, analizarse y explicarse las causas de la falla, para que, en consecuencia se pueda corregir.

## 5.2. Diseño de PCB mediante software.

### 5.2.1. Diseño del fotolito del circuito denominado *Luz nocturna automática* usando la técnica del marcador de tinta indeleble.

Como ya se dijo anteriormente, esta técnica no ocupa software, pero se ha considerado incluirla en este tema ya que es básica para el aprendizaje y comprensión de las técnicas que ocupan software. La idea general es la siguiente: Se tiene un circuito electrónico denominado *Luz nocturna automática*, y se quiere implementarlo en una placa de cobre como circuito impreso. Para ello, lo primero será obtener el fotolito correspondiente.

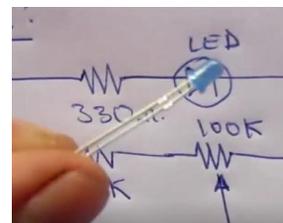
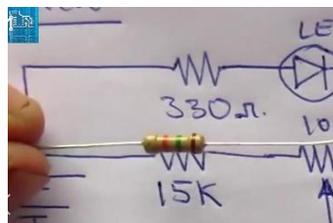
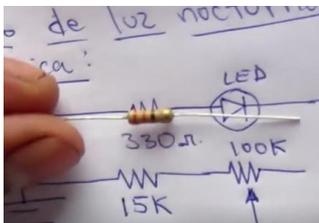


#### Equipo y Material necesario

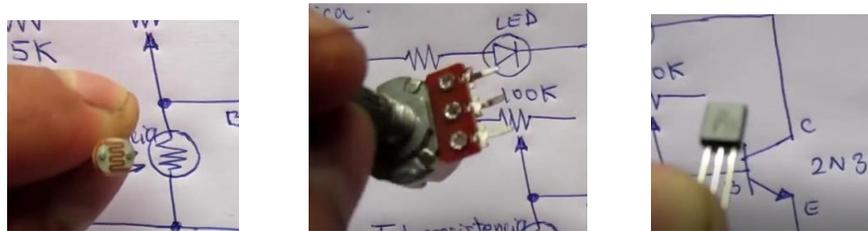
- **Todos** los componentes del circuito.
- Papel milimétrico.
- Una hoja translúcida (papel albanene o manteca).
- Una placa de cobre.
- Cinta adhesiva.
- Bolígrafos (tinta azul, negra y roja).
- Un plumón o marcador de tinta permanente.
- 1 punzón.
- Tijeras.
- Una segueta diente fino con arco.



**Primer paso.** Comprobar la disponibilidad de todos los componentes que necesitan en el circuito.



Las resistencias de 330 Ω y 15 K, El LED.

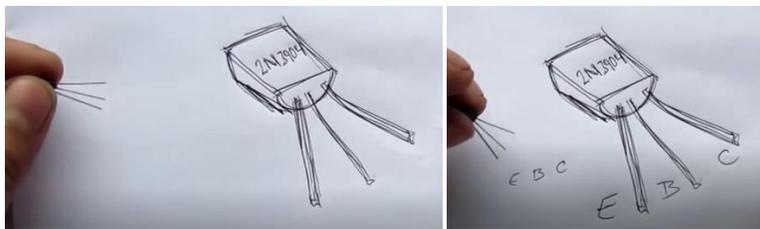


La fotorresistencia, el potenciómetro de 100 K y el transistor.

**Segundo paso.** Fijar el papel albanene a la hoja de papel milimétrico con cinta adhesiva (en las cuatro esquinas).

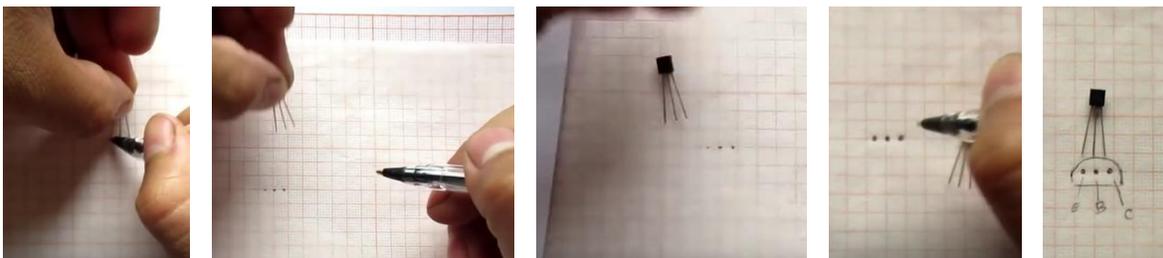


**Tercer paso.** Identificar los pines del transistor 2N3904 en la hoja de datos (Datasheet), o en un manual de transistores. Se hace un bosquejo del transistor en una hoja en blanco.

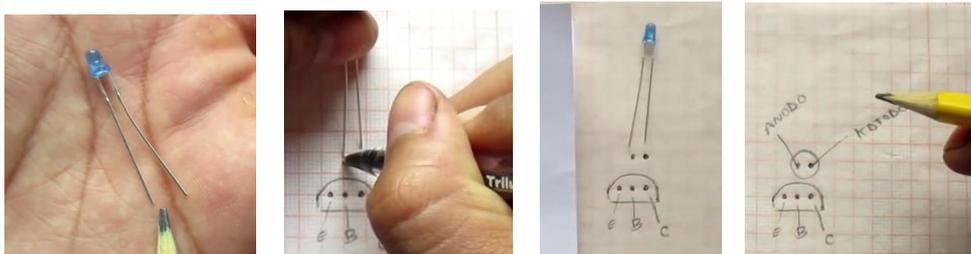


**Cuarto paso.** Ubicar los componentes en papel de acuerdo al circuito electrónico. Señalar los puntos en el papel donde irán insertadas las patitas de cada elemento.

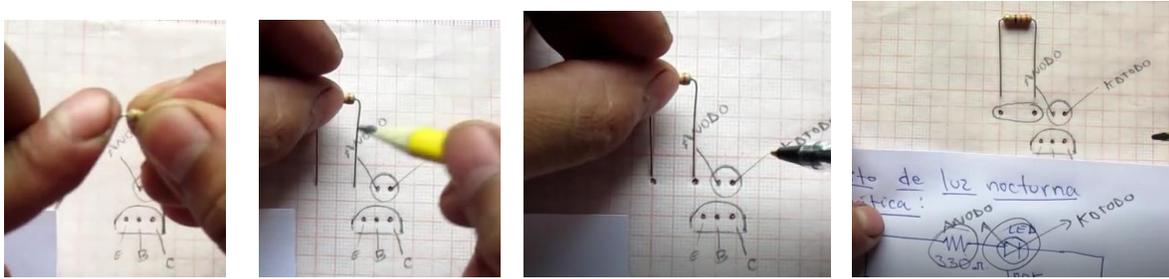
Se coloca el transistor. Abrir un poco las patas del transistor.



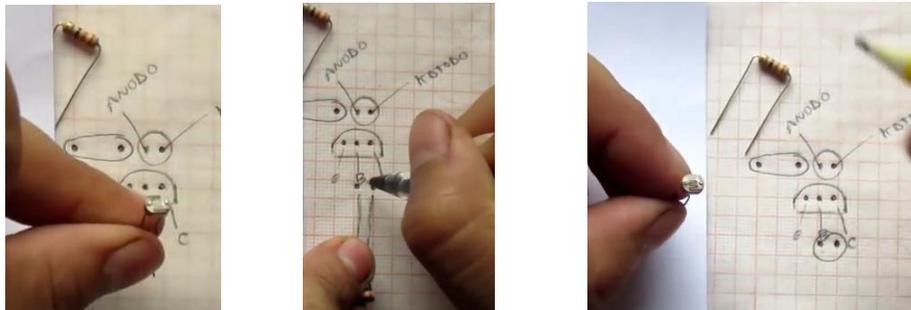
Se coloca el LED. La patita más pequeña es el cátodo.



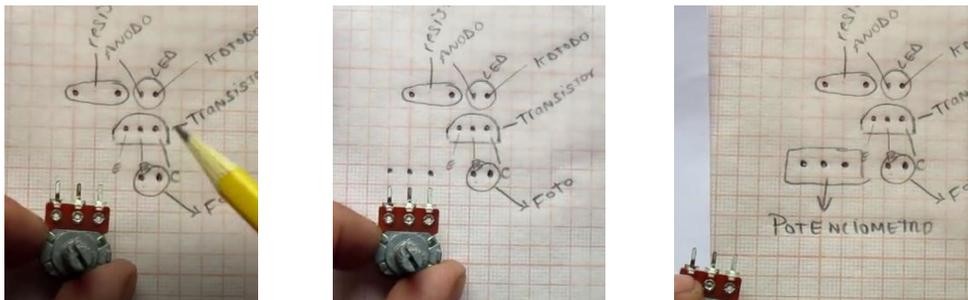
La resistencia de 330  $\Omega$



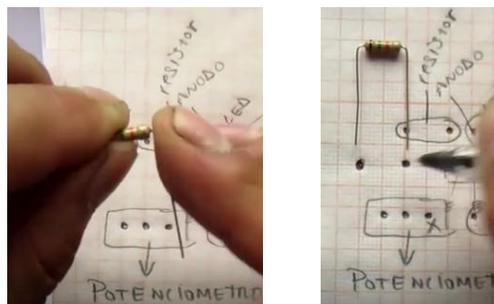
La fotorresistencia.



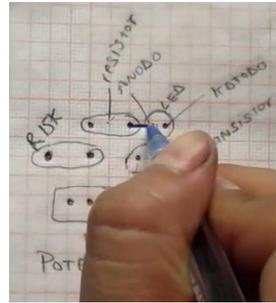
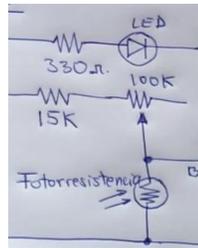
El potenciómetro



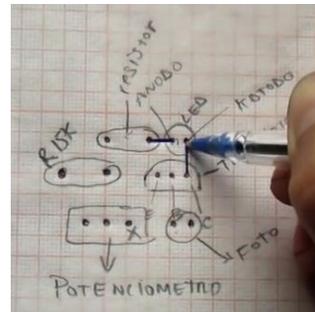
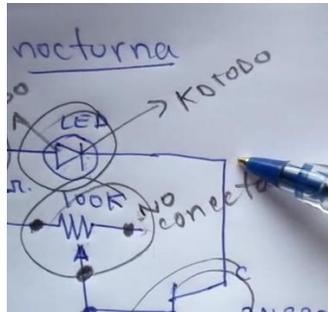
La resistencia de 15K



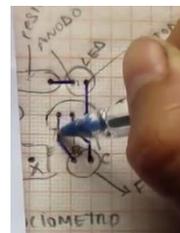
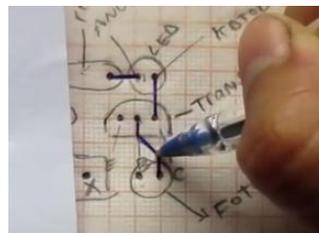
Quinto paso. Trazar las pistas.



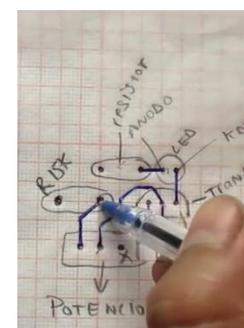
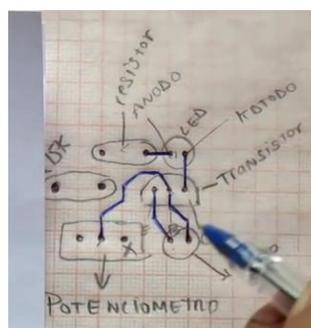
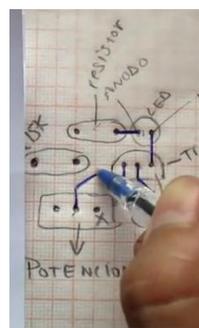
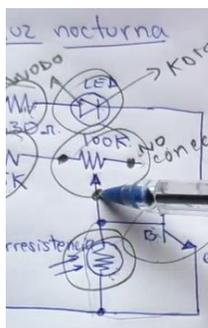
Entre resistencia de 330  $\Omega$  y el LED



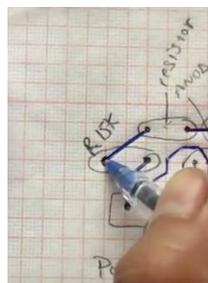
Luego del LED al colector del transistor.



Conectando el transistor y la fotoresistencia.



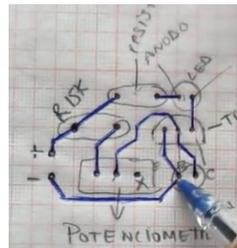
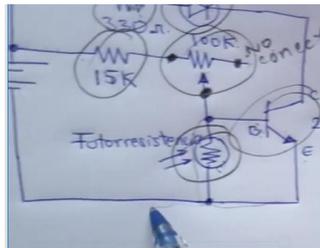
Conectando el potenciómetro.



Trazando pista entre las resistencias de 15K y 330  $\Omega$ .

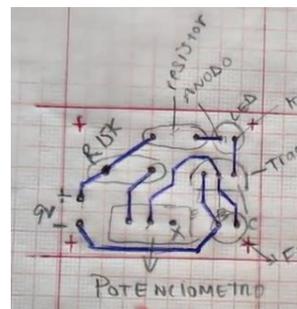
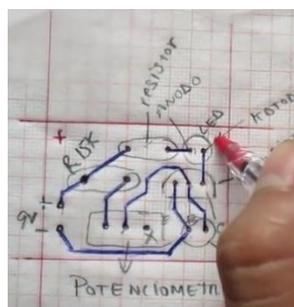
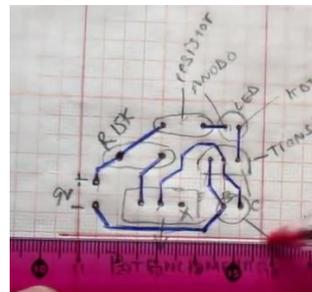
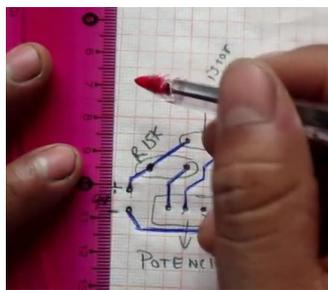


Se ubica la conexión de la batería

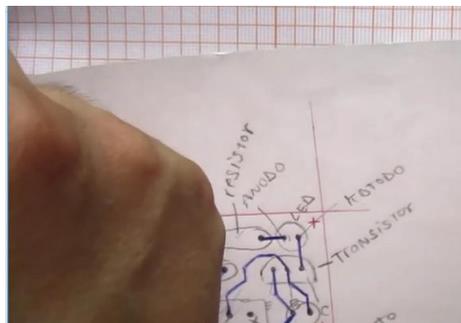


Se conectan las terminales de la batería.

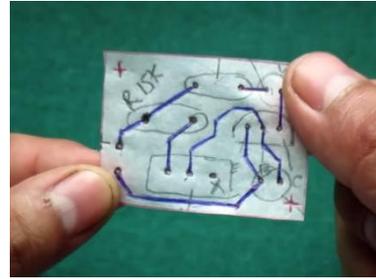
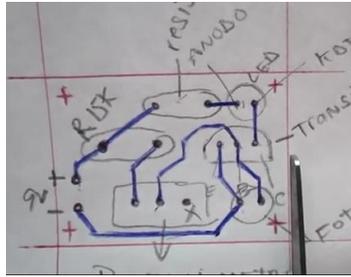
**Sexto paso.** Se trazan los límites del circuito en el patrón de papel.



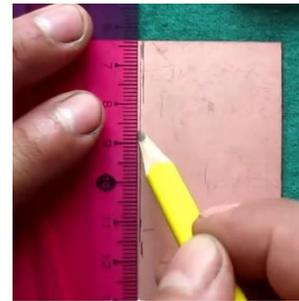
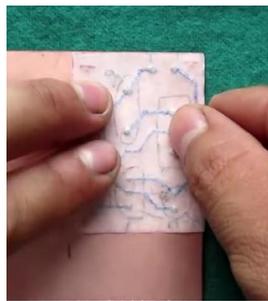
Se despega y se retira la hoja de papel translucida.



Se recorta el patrón dibujado con las tijeras.



Acercamos la lámina de baquelita con cobre. Se traza en la placa de cobre una superficie necesaria para ubicar el patrón del circuito.



**Séptimo paso.** Cortar la placa de cobre al tamaño necesario (100x90 mm).

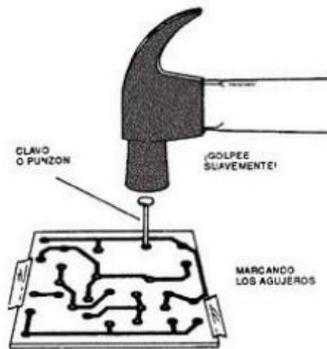


Una vez que se ha limpiado y lijado adecuadamente la lámina separada, se fija con cinta adhesiva el patrón de papel albanene sobre su superficie.

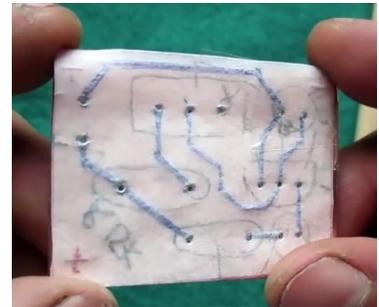


**Octavo paso.** Perforación de puntos de referencia con el punzón.

Con el clavo o punzón marcamos los puntos que corresponden a los agujeros por donde van a pasar los terminales de los componentes. Estas marcas, obtenidas con un golpe no muy fuerte, servirán de guía para la copia del dibujo.

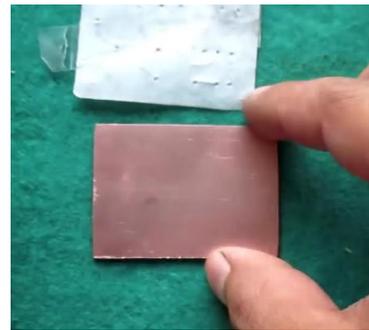


Marcando los agujeros con clavo y martillo.

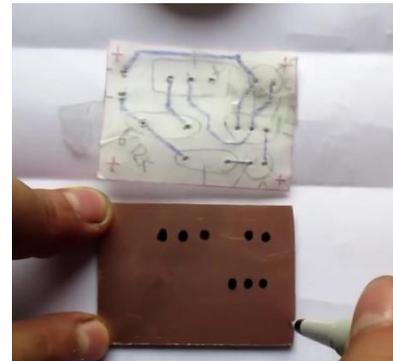
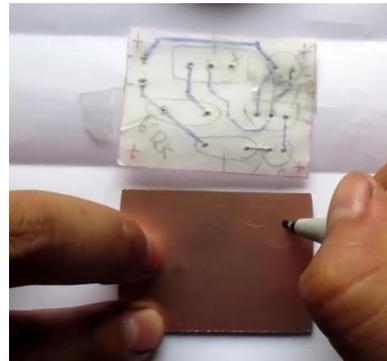
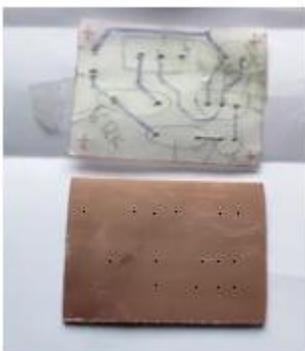


O puede hacerse uso del punzón

Se retira la cinta adhesiva y el patrón.

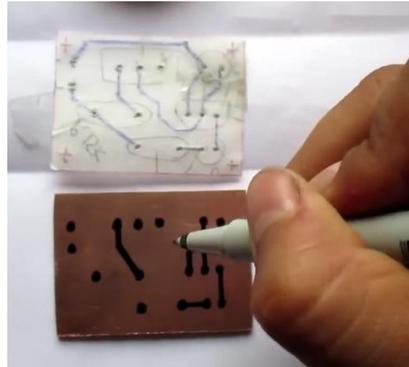
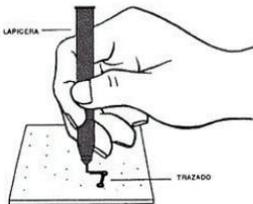


Se remarcan los agujeros con el bolígrafo. Luego se dibujan los pads (o islas) con el plumón de tinta permanente.

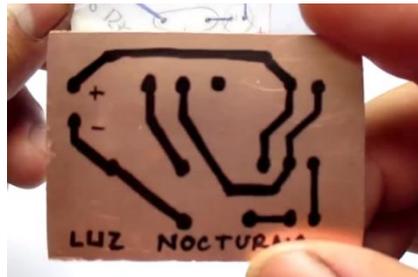


### Noveno paso. Trazado de pistas.

Con todos los orificios marcados, pasamos a copiar las conexiones. Se toma como referencia el patrón de papel para ir dibujando las pistas.



Finalmente hemos logrado el fotolito de nuestro circuito del cual deseamos construir una PBC.



Una de las etapas en el proceso de fabricación de los circuitos impresos es la impresión del fotolito sobre la placa de cobre. El material impreso en la placa (la tinta del marcador o el toner de una impresora laser) actuará como una máscara temporal que delinearé las partes donde serán las pistas de cobre que conectarán los componentes del circuito. Las zonas descubiertas, serán retiradas por medio de un proceso de ataque químico, como se explicará más adelante.

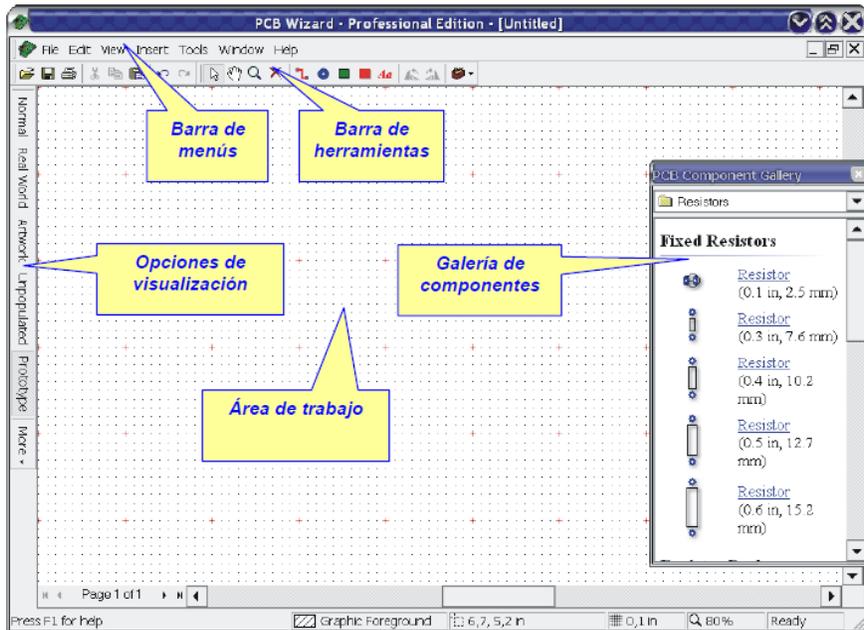
En este ejemplo, se muestra que el circuito se imprimió directamente por medio del marcador de tinta permanente en la placa de cobre. Por lo que en este método, la placa ya queda lista para siguiente etapa: el proceso de ataque químico para formar las pistas de cobre en ella.

#### 5.2.2 Diseño del fotolito con *PCB Wizard* de *LiveWire*.

*Pcb Wizard* es un programa diseñado para el ámbito educativo que permite crear esquemas de circuitos electrónicos y a partir de estos, obtener de una manera sencilla el diseño del circuito impreso a una o dos caras.

##### 5.2.2.1 La ventana de entrada del programa.

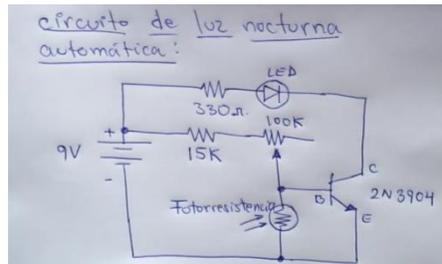
Al iniciar el programa, aparece una ventana similar a la mostrada abajo. La zona central de la ventana se denomina área de trabajo y dispone de una serie de puntos formando una rejilla (*grid*) que nos facilita la alineación de componentes. Esta rejilla se puede suprimir o modificar. La parte superior de la ventana está formada por una barra de título, una barra de menú y una barra de herramientas, siguiendo la disposición típica de cualquier programa para Windows. En la parte derecha del área de trabajo tenemos una ventana flotante denominada galería de componentes y es donde se hallan todos los elementos que podemos arrastrar para crear un circuito. A la izquierda del área de trabajo se halla una barra de herramientas vertical cuyos botones nos permiten modificar la forma en que se visualiza nuestro circuito.



### 5.2.2.2 Realización de esquemas.

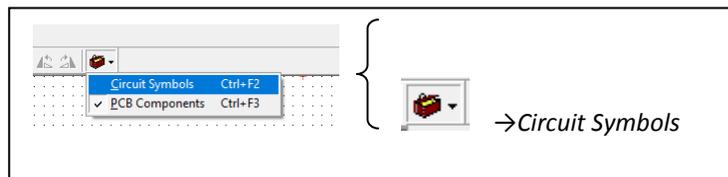
Para comprender mejor el funcionamiento del programa, vamos a realizar un circuito paso a paso.

Partimos del siguiente boceto:

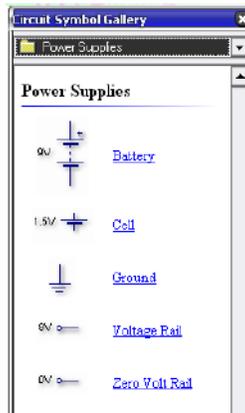


Se trata de un circuito denominado *luz nocturna automática*, ya presentado anteriormente en el *Ejemplo 5.1*. El primer paso es emplazar los componentes en el área de trabajo. Para ello tenemos que acceder a la Galería de

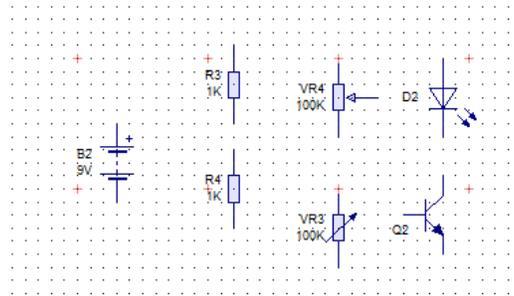
Símbolos de Circuito haciendo clic en  (es el icono de un maletín) de la barra de herramientas y aparece el desplegable donde marcamos "**Circuit Symbols**".



En la parte derecha del área de trabajo aparecerá una ventana donde seleccionaremos los componentes de nuestro circuito y los arrastraremos a donde nos interese.



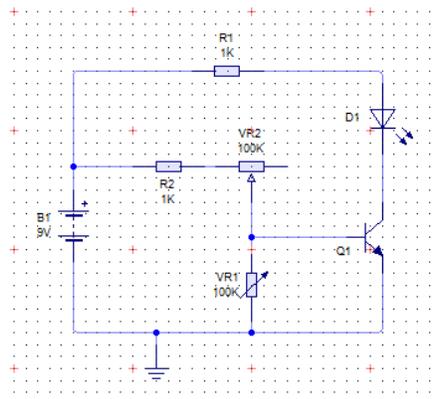
Para seleccionar un componente, elegimos la carpeta que lo contiene abriendo el desplegable superior. Por ejemplo, la batería se halla en **“Power Supplies”**, las resistencias en **“Passive Components”**, el integrado en **“Integrated Circuits”**, la NTC en **“Input Components”** y el LED en **“Output Components”**. Una vez emplazados los componentes podemos cerrar la galería para trabajar más cómodamente. El área de trabajo debe quedar como sigue:



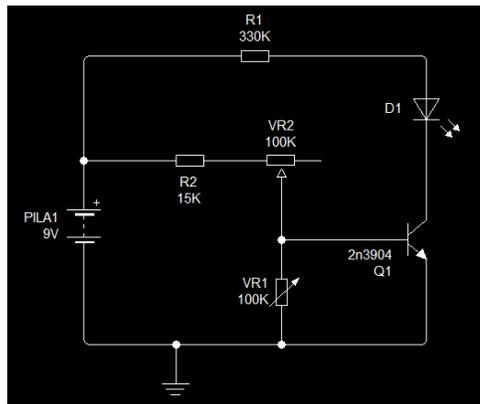
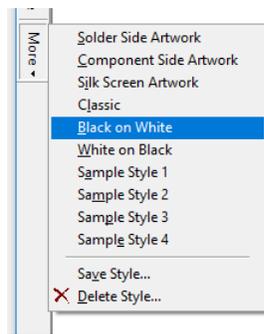
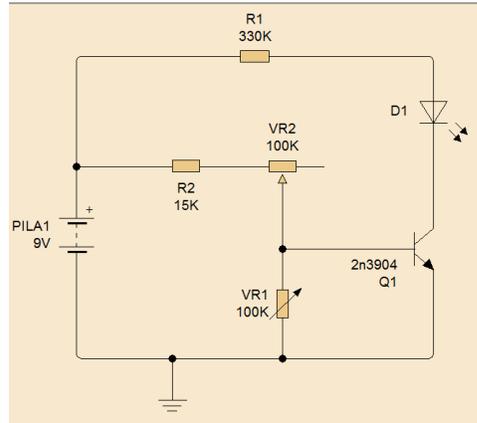
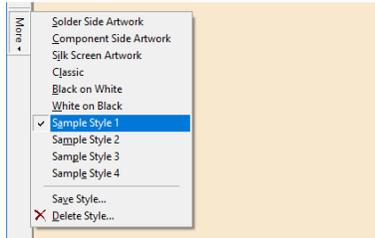
Se hace la aclaración que este programa no cuenta con ningún elemento de fotorresistencia, por lo que se optó por sustituirlo por una resistencia variable VR3. A continuación debemos girar las resistencias R3, R4 y el potenciómetro VR4. Para ello, seleccionamos haciendo clic sobre uno de los componentes y pulsamos sobre el icono girar a la derecha o girar a la izquierda de la barra de herramientas. Posteriormente arrastrando los símbolos, los situamos en el lugar que les corresponde en el circuito.



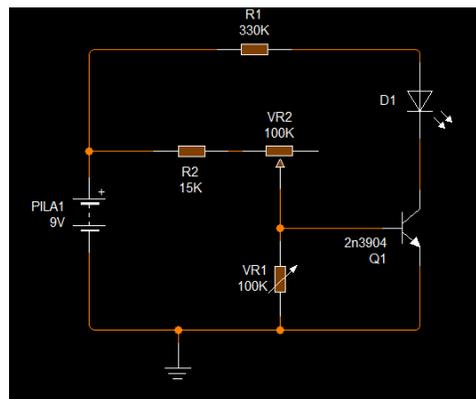
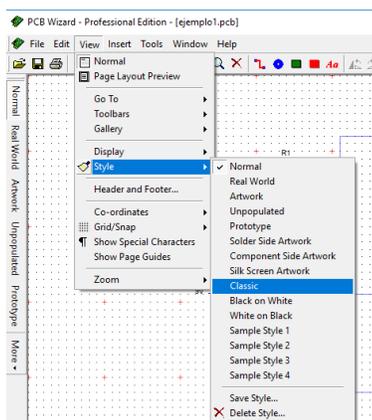
Una vez reorientados y situados los elementos de acuerdo al circuito, podemos comenzar a unir componentes. Esta operación se realiza colocando el puntero del ratón sobre el extremo de un componente y cuando aparezca un cuadrado se arrastra hasta el extremo del componente al que queremos llegar y cuando aparecerá otro cuadrado soltamos, quedando realizada la conexión. Una vez realizadas todas las conexiones el circuito quedará así:



Por último, solo queda cambiar el valor y nombre de los componentes. Para ello basta con hacer doble clic sobre las etiquetas que queremos modificar y escribir los nuevos valores o nombres en los cuadros de diálogo que aparecen. Una vez terminado el circuito, se puede cambiar su aspecto mediante la barra vertical izquierda. Abajo se pueden observar distintos estilos de visualización de esquemas.

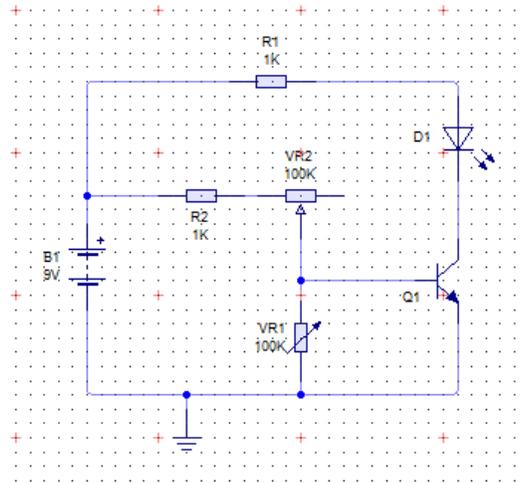


Para cambiar de visualización, también se puede usar la ruta View → Style → Classic, por ejemplo.



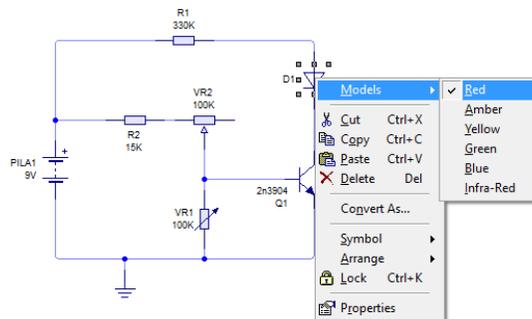
### 5.2.2.3 Diseño de un circuito impreso a partir de un esquema.

Partimos de un esquema que podemos dibujar del modo explicado anteriormente, o abrirlo desde el menú **File/Open**. En este caso vamos a utilizar el esquema realizado en el apartado anterior:

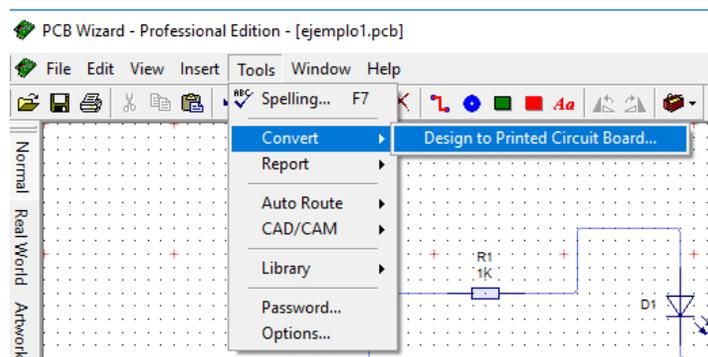


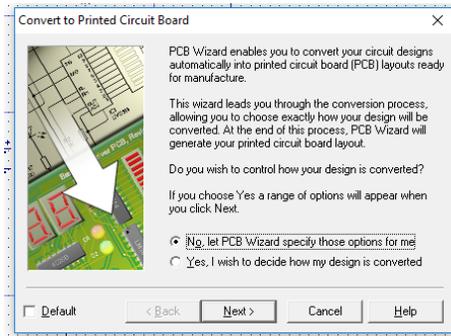
### 5.2.2.4 Cambio del modelo de un componente.

Una vez abierto el esquema, si lo deseamos, podemos hacer cambio de modelo de algún elemento. Sólo tenemos que hacer clic sobre el mismo con el botón derecho y seleccionar del menú emergente que aparece la opción **Model**. Al hacer esto, aparece una lista donde podemos seleccionar el modelo exacto para el componente en cuestión. Por ejemplo, si aplicamos lo dicho al LED del circuito de la derecha, podemos seleccionar el color entre los que aparecen en la lista.



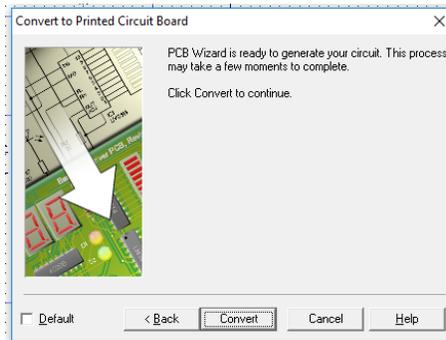
Listo el circuito, nos vamos al menú **Tools**, hacemos clic en la opción **Convert** y seleccionamos **Desing to Printed Circuit Board**.



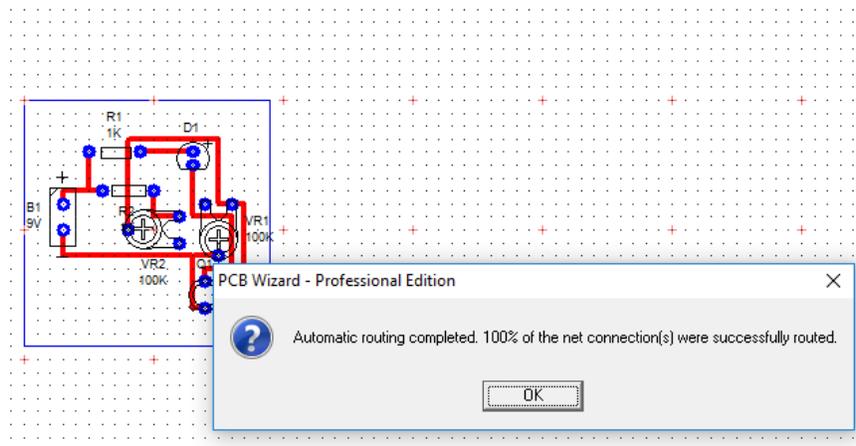
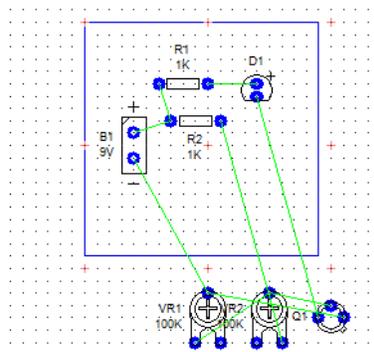


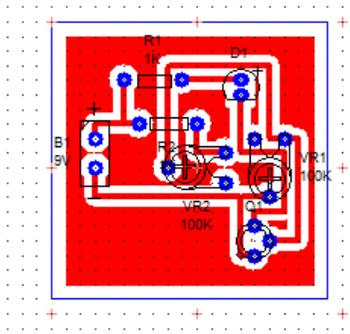
Aparecen dos opciones. La primera va marcada por defecto y deja libertad al programa para realizar la conversión. Si marcamos la segunda opción podemos modificar algunos aspectos como el tamaño y forma de la placa. En este caso pulsamos **Next** sin modificar nada.

Al pulsar **Next**, aparece otro cuadro de diálogo que nos dice que el programa está generando nuestro circuito y que el proceso puede tardar un poco.



Pulsamos **Convert** y el programa comienza a arrastrar los componentes y posteriormente a trazar las pistas. Durante este proceso podemos ver como se mueven los componentes hacia la placa y finalmente aparece el circuito terminado.



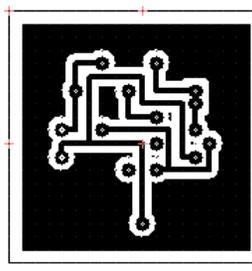


Podemos visualizar nuestro circuito de distintas formas pulsando los botones situados a la izquierda del área de trabajo:

<p><b>Normal.</b> Es la vista que aparece por defecto.</p>	<p><b>Real Work.</b> Muestra como quedaría nuestro circuito una vez terminado.</p>	<p><b>Artwork.</b> Es la plantilla del circuito impreso</p>	<p><b>Unpopulated.</b> Es la vista del circuito impreso terminado.</p>

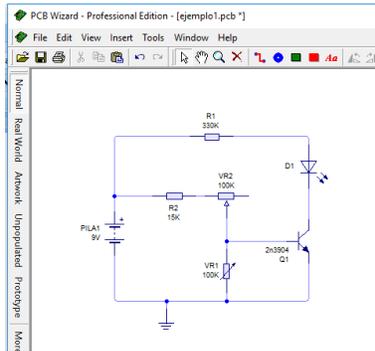
<p><b>Prototype.</b> Muestra el circuito terminado, sin referencias de componentes</p>	<p><b>Component Side Artwork.</b> Solo muestra los discos de soldadura y los taladros.</p>	<p><b>Silk Screen Artwork.</b> En esta vista solo se muestra la disposición de los componentes.</p>	<p><b>Classic.</b> Esta vista recuerda a los programas de diseño profesionales</p>

En este momento, el diseño del circuito patrón que irá impreso en la placa ha concluido. Podemos proceder a imprimir o guardar el archivo.

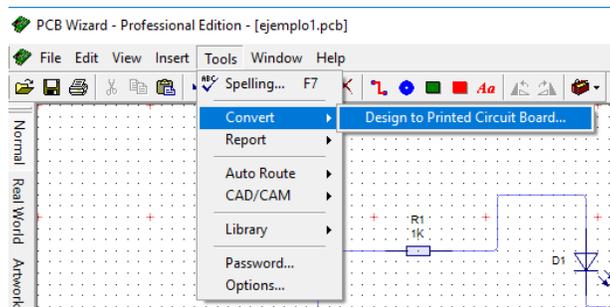


### 5.2.2.5 Otras opciones para el diseño con el PCB-Wizard.

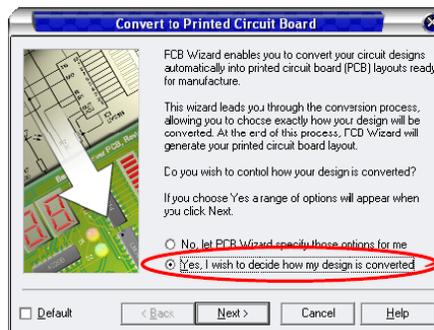
Se abre de nuevo el esquema que hemos utilizado anteriormente por medio de la ruta File→Open→ejemplo1.pcb



Listo el circuito, se presiona **Tools** en el menú de herramientas, hacemos clic en la opción **Convert** y seleccionamos **Design to Printed Circuit Board**.

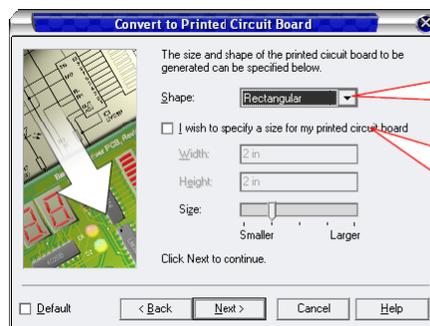


En el cuadro de diálogo que aparece marcamos la segunda opción (*Yes, I wish to decide how my design is convert*):



Al seleccionar esta opción, el programa nos deja intervenir en el diseño del circuito, pudiendo elegir, entre otras cosas, el tamaño y la forma de la placa.

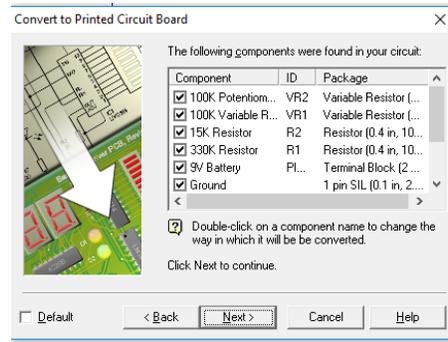
Al pulsar **Next** aparece un cuadro de diálogo en el que podemos seleccionar la forma y tamaño de la placa:



En esta lista seleccionamos la forma de la placa.

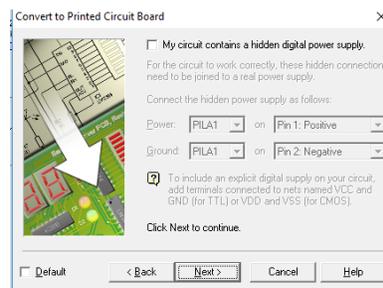
Si queremos modificar las dimensiones del circuito debemos marcar esta casilla para que se activen los controles de abajo.

Pulsar **Next** y aparece la lista de los componentes de nuestro circuito.

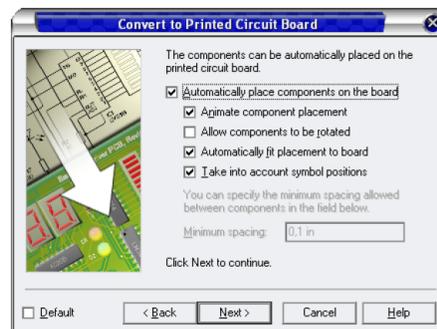


Si queremos eliminar alguno solo tenemos que hacer clic en la casilla que lleva a la izquierda y desaparecerá la marca. De este modo, el elemento en cuestión no formará parte de nuestro circuito. Si hacemos doble clic sobre un componente, el programa nos da la opción de modificar sus características.

Haciendo clic en el botón **Next** aparece un cuadro de diálogo que solo hay que tener en cuenta cuando trabajamos con circuitos digitales con fuentes ocultas.



Como no es nuestro caso, no marcamos nada, volvemos a pulsar **Next** y aparece el cuadro siguiente:



Este cuadro nos permite jugar con las siguientes opciones:

**Automatically component placement:** Con esta opción activada, el programa distribuye los componentes sobre la placa automáticamente. Si queremos emplazar los componentes manualmente debemos desactivar esta casilla.

**Animate component placement:** si marcamos la casilla de esta línea, el programa nos mostrará una animación de la distribución de los componentes sobre la placa.

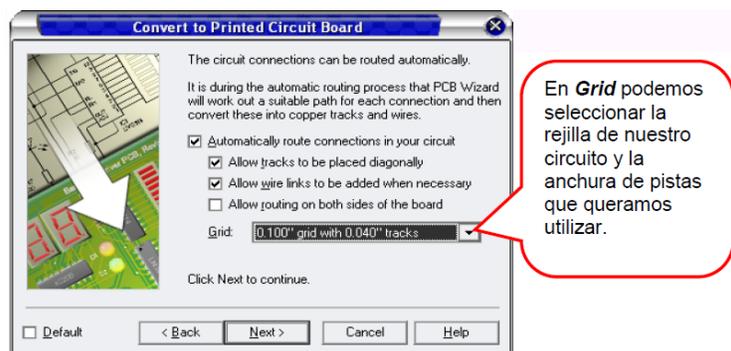
**Allow components to be rotated:** Si la casilla está activada permitimos al programa girar los componentes. Es conveniente que esta opción esté siempre habilitada.

**Automatic fit placement to board:** Esta opción sirve para que la distribución de los componentes sea más o menos compacta. Si la desactivamos, los componentes quedarán más espaciados.

**Take into account symbol positions:** Cuando esta opción está seleccionada, el programa respetará la posición que ocupaban los componentes en el esquema original.

**Minimun spacing:** Mediante esta opción se puede fijar el espacio máximo que se deja entre componentes y solo está habilitada cuando se ha especificado previamente un determinado tamaño de placa.

Al hacer clic en **Next** (siguiente) aparece otro cuadro de diálogo:



En este cuadro se muestran las distintas opciones de conexión entre componentes:

**Automatically route conexions in your circuit:** Esta opción está activada por defecto y permite que el programa realice las conexiones automáticamente.

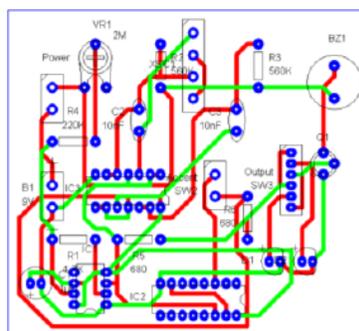
**Allow traks to be placed diagonally:** Si activamos esta casilla permitimos el trazado de pistas en diagonal. Cuando esta opción esta desactivada, todas las pistas serán horizontales y verticales.

**Allow wire links to be added when necessary:** Activando esta opción, **Pcb Wizard** realizará puentes entre los componentes que no pueda unir mediante pistas.

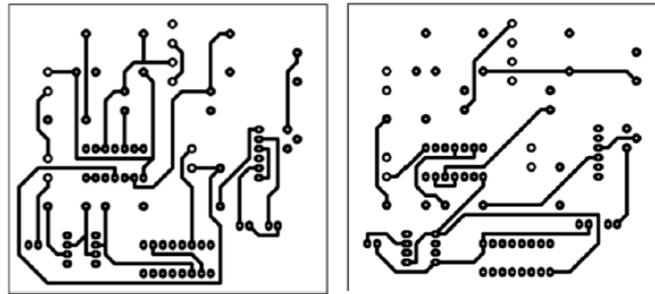
**Allow routing on both sides of the board:** Esta casilla se activa cuando queremos realizar un circuito con pistas en las dos caras.



Cuando diseñamos un circuito a doble cara obtenemos un esquema con líneas verdes y rojas. Las líneas rojas simbolizan las pistas situadas en la cara de soldadura y las líneas verdes son las pistas ubicadas en la cara de los componentes.



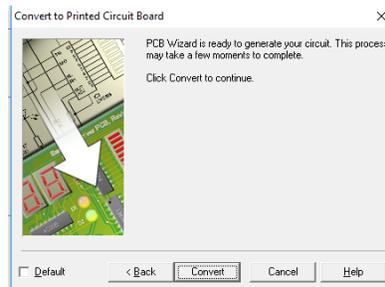
Para obtener los circuitos de ambas caras por separado hacemos clic en el botón de la barra vertical **More** y seleccionamos **Solder side artwork** o **Components side artwork**. Los resultados obtenidos se muestran abajo:



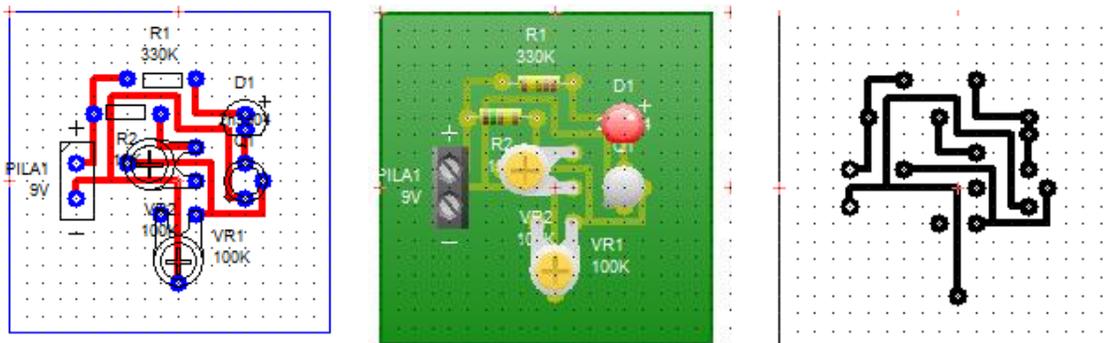
Pulsamos siguiente y aparece el último cuadro de diálogo, donde tenemos la opción **Automatically add copper area(s) to the board**, que está seleccionada por defecto y sirve para añadir áreas de cobre entre las pistas (se puede ver el resultado en la imagen de la izquierda). La separación entre estas “islas” de cobre y las pistas se puede modificar en la casilla **Insulation gap**. Si en nuestro diseño no queremos añadir áreas de cobre solo tenemos que desmarcar esta opción.



Pulsamos el botón siguiente y aparece un mensaje que dice que el programa está generando el circuito y que puede tardar unos instantes.



Hacemos clic sobre el botón **Convert** y el programa comienza a colocar los componentes y a trazar las pistas. En pocos segundos nuestro circuito estará terminado:



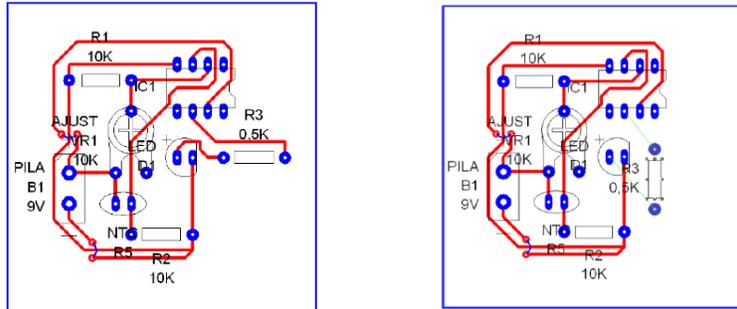
En la imagen de arriba puedes ver tres vistas del circuito terminado. La primera es la vista **“Normal”**, que muestra el programa por defecto. La del centro es una recreación de cómo quedaría el circuito una vez terminado (**Real work**) y el esquema de la derecha es el fotolito o plantilla para transferir al cobre denominada **“Solder side artwork”**. Si queremos imprimir nuestro prototipo basta con ir al menú **File**, seleccionar la opción **Print** y hacer clic en **Print** para imprimir la vista que tenemos en pantalla o seleccionar alguna de las vistas que aparecen debajo de esta opción.

### 5.2.2.6 Modificación de un circuito

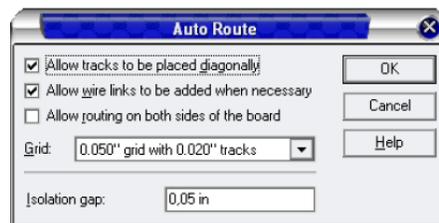
En el circuito obtenido en el apartado anterior es posible realizar modificaciones como mover o girar componentes, modificar el grosor de las pistas, cambiar el tamaño y forma de la placa, insertar texto, objetos y relación de componentes. Basándonos en nuestro ejemplo, veamos cómo se realizan estas modificaciones:

#### 5.2.2.6.1 Mover o girar componentes:

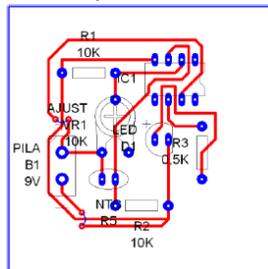
Para mover un componente basta con arrastrarlo y para girarlo solo hay que pulsar los botones de giro de la barra de herramientas después de seleccionar el componente en cuestión. Si en nuestro ejemplo, queremos girar 90° en sentido contrario a las agujas del reloj y desplazar a la izquierda la resistencia R3 de 0.5 K, la seleccionamos, pulsamos y arrastramos el componente a su nueva posición:



En la imagen de la izquierda se puede ver el circuito de partida a arriba y a la derecha el resultado obtenido. Como se puede ver, han desaparecido las pistas de la resistencia y en su lugar aparecen unas líneas rectas de color verde denominadas “**Nets connections**” que determinan las conexiones entre componentes. Para trazar de nuevo las pistas que conectan la resistencia R3 al resto del circuito hay que ir al menú Tools, seleccionar **Autroute** y hacer clic en la opción **Route all Nets**. Al hacer esto aparece un cuadro de diálogo como este:

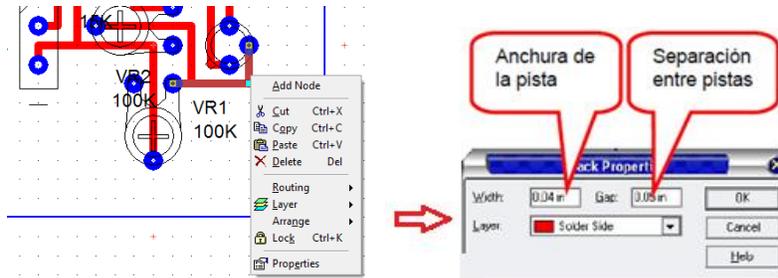


En este cuadro podemos seleccionar si queremos pistas diagonales, si queremos que se inserten puentes de cable o si nuestra placa va a tener dos caras. También podemos modificar el ancho de pista y la pauta de la rejilla. En nuestro caso, marcamos las dos primeras opciones y elegimos en *Grid* 0.050” grid with 0.020” tracks. Pulsamos OK y nuestro circuito quedará más o menos así:



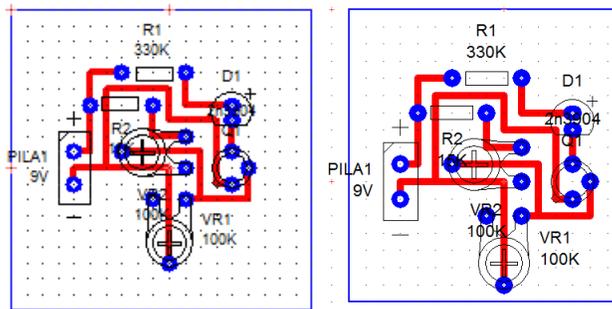
### 5.2.2.6.2 Modificar el grosor de las pistas:

Para modificar el grosor de una pista de nuestro circuito hacemos clic sobre ella con el botón derecho para que aparezca el cuadro de diálogo donde seleccionaremos la opción **Properties**. Al hacer esto, emerge un nuevo cuadro de diálogo donde podemos elegir el nuevo grosor para la pista seleccionada:

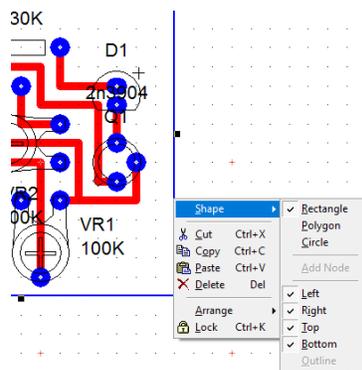


### 5.2.2.6.3 Modificar el tamaño y forma de un circuito:

El tamaño de una placa se modifica arrastrando los puntos de control que aparecen sobre el marco azul al seleccionarlo. En nuestro ejemplo podemos ahorrar espacio reduciendo el tamaño de la placa. Al hacer esto el circuito puede quedar como el de la imagen situada abajo de estas líneas.

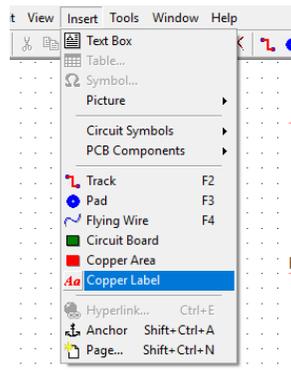


Para modificar la forma seleccionamos el marco azul haciendo clic dentro de él y una vez seleccionado volvemos a hacer clic con el botón derecho del ratón. Al hacer esto, aparece una lista en la que elegimos **Shape** y emerge un cuadro de diálogo con todas las opciones necesarias para modificar la forma de nuestro circuito.



#### 5.2.2.6.4 Insertar texto, objetos y relación de componentes:

Pcb Wizard nos permite insertar en nuestros circuitos texto y diversos objetos. El texto se inserta eligiendo la opción **Copper label** del menú **Insert**.



Si queremos insertar una imagen seleccionamos **Picture** dentro de este mismo menú.

Mediante la opción **Report** del menú **Tools** podemos insertar de forma automática una lista de componentes, siempre y cuando esta operación se realice antes de convertir el esquema en circuito impreso. En la figura de abajo se puede observar el resultado obtenido:

#### 5.2.2.7 Resumen de lo obtenido mediante **PCB WIZARD**.

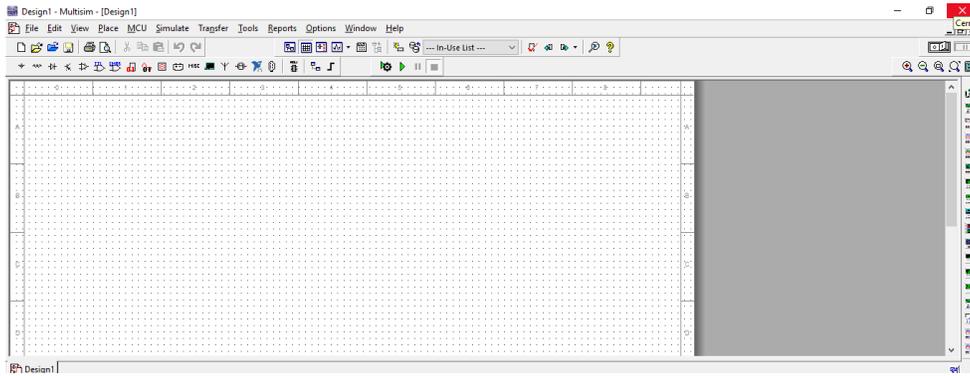
Name	Quantity
100K Potentiometer	1
100K Variable Resistor	1
1K Resistor (1/4W)	2
9V Battery (Ideal)	1
LED (Red)	1
NPN Transistor (Ideal)	1

#### 5.2.3 Diseño del fotolito con **Ultiboard de Multisim**.

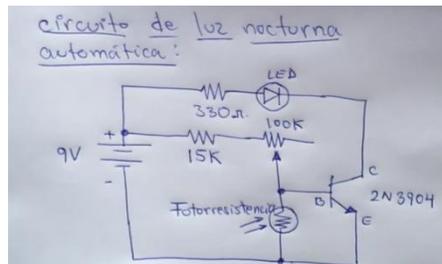
*Ultiboard* es una herramienta de software para el diseño de tarjetas PCB y está integrada con el programa *Multisim*. Es decir, cuando se instala *Multisim*, también se instala *Ultiboard* de manera automática. *Ultiboard* es una herramienta fácil de aprender a utilizar. Claro, no está de más tener ciertos conocimientos de la terminología de diseño de PCBs y algunas generalidades.

En este tutorial de *Ultiboard* conoceremos las generalidades del software y definiremos algunos de los términos más importantes de diseño de PCBs utilizando la versión de *Multisim 13*. En la medida de lo posible, las instrucciones se colocarán en ambos idiomas para facilitar su comprensión a la mayoría de los que visualicen esta página.

Iniciamos abriendo el programa *Multisim*:

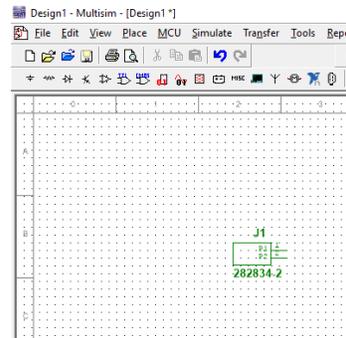
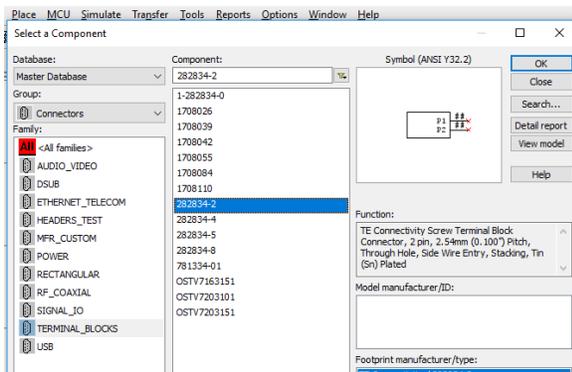


donde vamos a construir el esquema eléctrico del siguiente boceto:

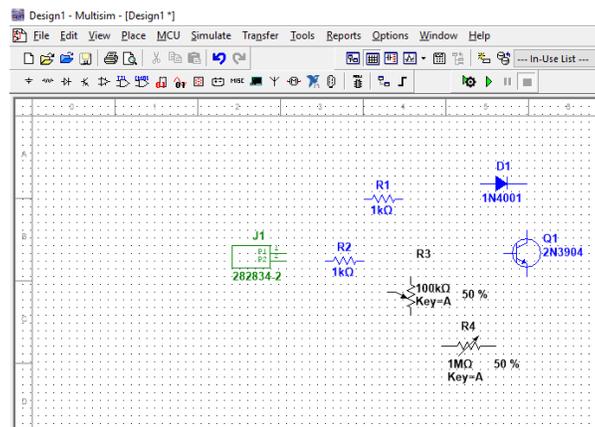


Procedimiento:

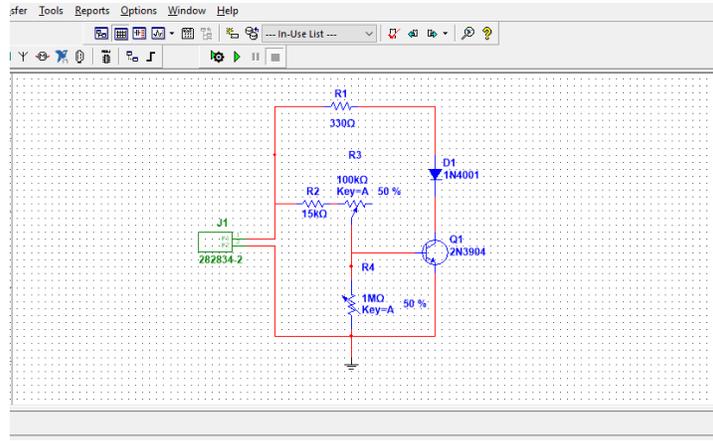
- Colocar el conector J1, que será el conector de la batería de 9 V:  
Connectors → Terminal blocks → 282834-2 → J1 Terminal block



- Se colocan los siguiente elementos, se les posiciona adecuándolos al circuito:



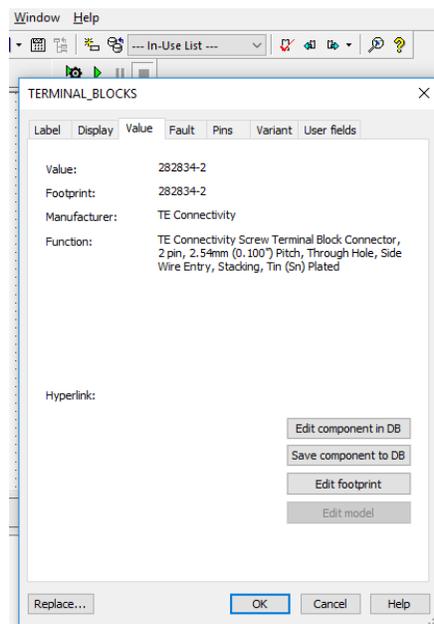
Finalmente, el esquema que debemos tener es:



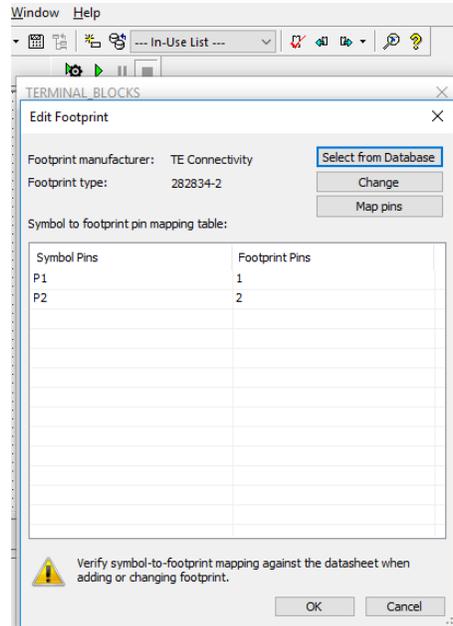
Todo componente tiene un footprint. Este deberá ser asignado de acuerdo a las características físicas del elemento que disponemos para construir nuestro circuito. También es muy útil consultar con la hoja de especificaciones del fabricante (en inglés *Datasheet*), lo cual permite la identificación física de las terminales y hacer la correspondencia de ellas con el footprint seleccionado.

### 5.2.3.1 Asignación de footprint para el conector J1:

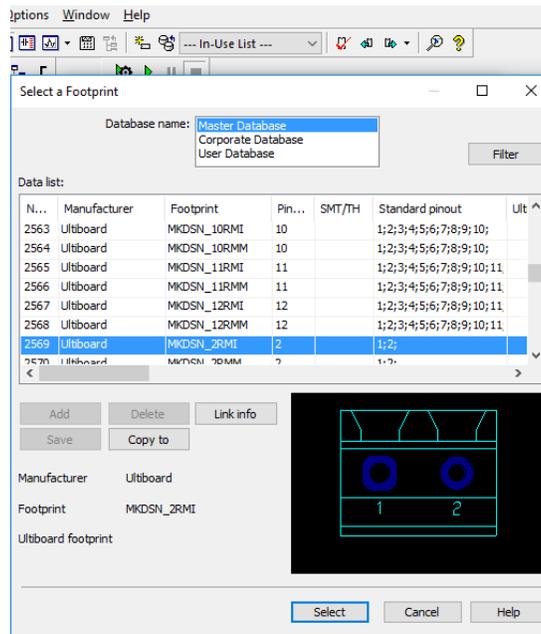
a.- Se señala componente → clic derecho → properties → (En la ventana THERMINAL BLOCKS y en la pestaña value) → Edit footprint



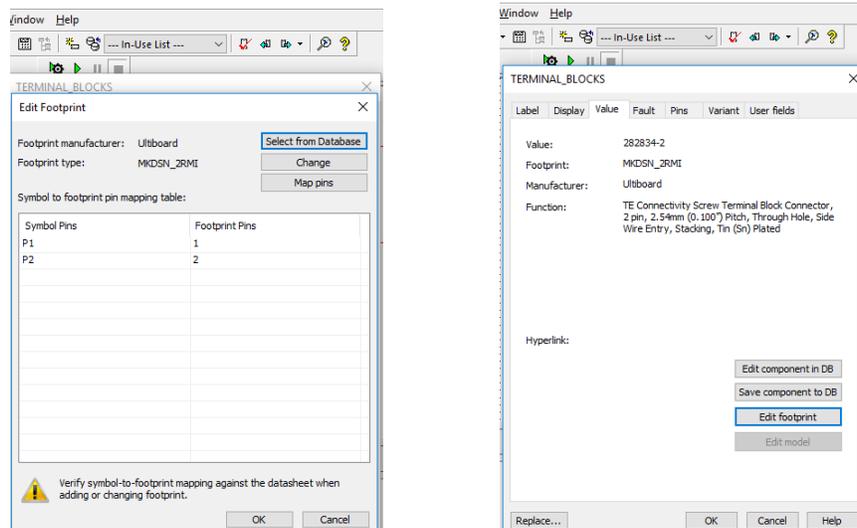
b.- Presionar Edit footprint →Select from Database →select a footprint



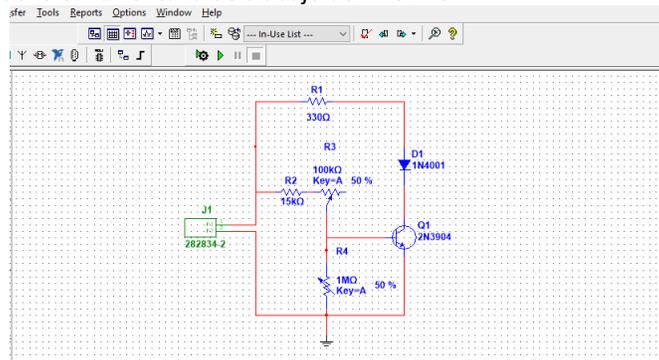
c.- En Select a Footprint buscar el footprint MKDSN\_2RMI)→select. Podemos seleccionar el footprint MKDS15\_2RMM o el MKDSN\_2RMI. Se ha escogido este footprint porque es el que más conviene al conector que hemos conseguido con los proveedores.



d.- Se presiona Select→ Edit Footprint (aquí se muestra la Tabla de correspondencia entre los pines del símbolo y del footprint seleccionado) →ok→ ventana THERMINAL BLOCKS→ok,

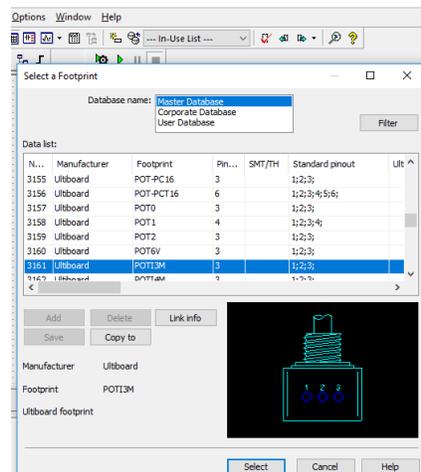


con lo que estaremos de nuevo en la ventana de trabajo del MULTISIM.

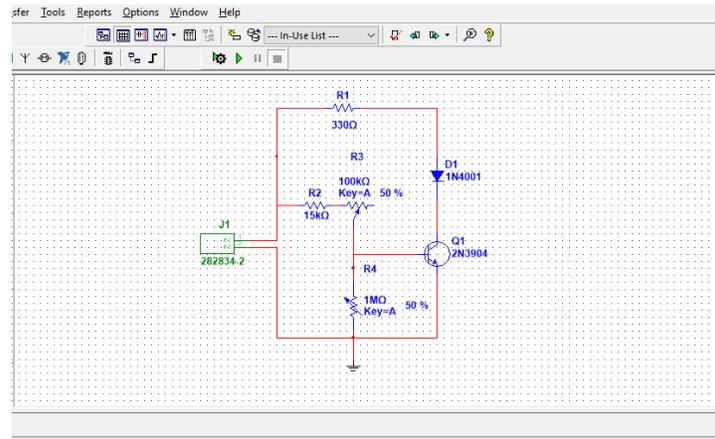


### 5.2.3.2 Ahora el potenciómetro R3 lo vamos asociar con POT13M, bajo el mismo procedimiento.

- Se señala componente→clic derecho→properties→(En la ventana potentiometer y en la pestaña value)→presionar Edit footprint
- En Edit footprint →Select from Database → se muestra la ventana Select a Footprint
- En Select a Footprint buscar el footprint POT13M.



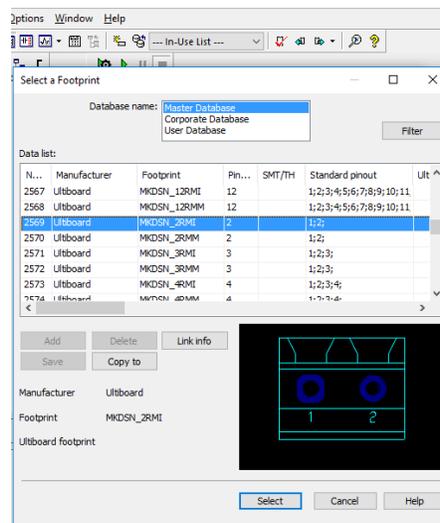
d.- Se presiona Select→ Edit Footprint (aquí se muestra la Tabla de correspondencia entre los pines del símbolo y del footprint seleccionado) →ok→ ventana potentiometer →presionar ok, con lo que estaremos de nuevo en la ventana de trabajo del MULTISIM.



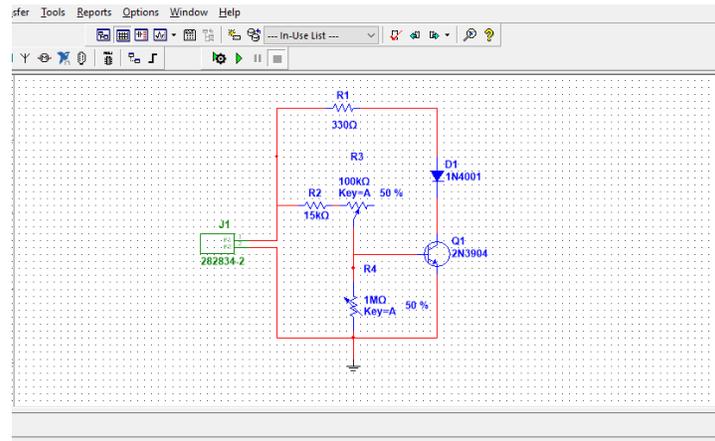
La resistencia variable R4 se está usando en lugar de la fotoresistencia que se indica en el diagrama, ya que este simulador (el Multisim) no cuenta con un símbolo que sea represente este elemento. Este elemento también lo vamos a asociar con el mismo footprint utilizado para el conector J1.

### 5.2.3.3 Procedimiento para asignar footprint a R4.

- a.- Se señala componente→clic derecho→properties→(Se abre la ventana Variable Resistor y en la pestaña value)→presionar Edit footprint
- b.- En Edit footprint →Select from Database → se muestra la ventana Select a Footprint
- c.- En Select a Footprint buscar el footprint MKDS15\_2RMM o el MKDSN\_2RMI.



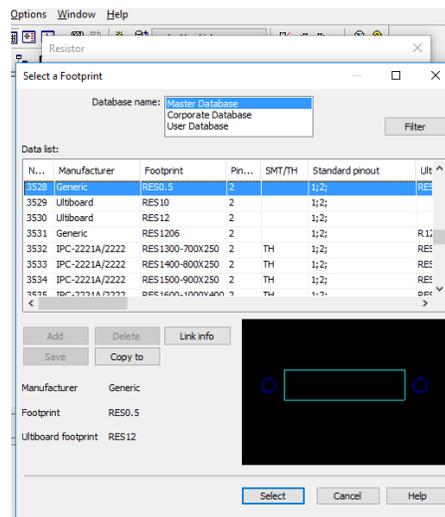
d.- Se presiona Select→ Edit Footprint (aquí se muestra laTabla de correspondencia entre los pines del símbolo y del footprint seleccionado) →ok→ ventana Variable Resistor →presionar ok, con lo que estaremos de nuevo en la ventana de trabajo del MULTISIM.



#### 5.2.3.4 Procedimiento para asignar footprint a R1 y R2.

A las resistencias R1 y R2, similarmente se le asigna el footprint RES0.5.

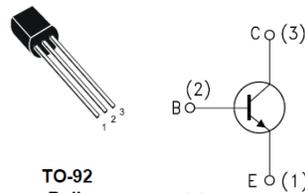
- Se señala componente→clic derecho→properties→(Se abre la ventana Resistor y en la pestaña value)→presionar Edit footprint
- En Edit footprint →Select from Database → se muestra la ventana Select a Footprint
- En Select a Footprint buscar el footprint RES0.5 u otro similar.



d.- Se presiona Select→ Edit Footprint (aquí se muestra la Tabla de correspondencia entre los pines del símbolo y del footprint seleccionado) →ok→ ventana Variable Resistor →presionar ok, con lo que estaremos de nuevo en la ventana de trabajo del MULTISIM.

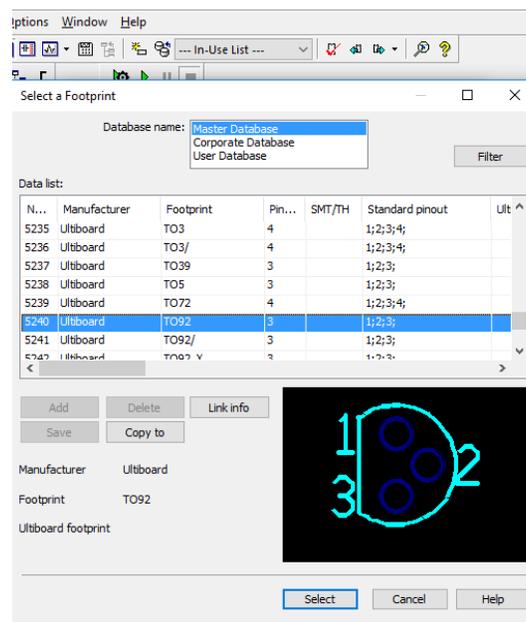
### 5.2.3.5 Procedimiento para asignar footprint al transistor Q1.

Para el componente Q1 (el transistor) el footprint que se asigne, depende del transistor que se disponga físicamente. Debemos consultar con la hoja de datos (data sheet). Viene en varios tipos de empaquetado. En este ejemplo, suponemos que el transistor que se está usando es como el que se muestra.



Así, vamos a usar el footprint TO-92. Igual, se sigue el procedimiento ya señalado.

- Se señala componente → clic derecho → properties → (Se abre la ventana BJT\_NPN y en la pestaña value) → presionar Edit footprint
- En Edit footprint → Select from Database → se muestra la ventana Select a Footprint
- En Select a Footprint buscar el footprint TO-92 u otro similar.

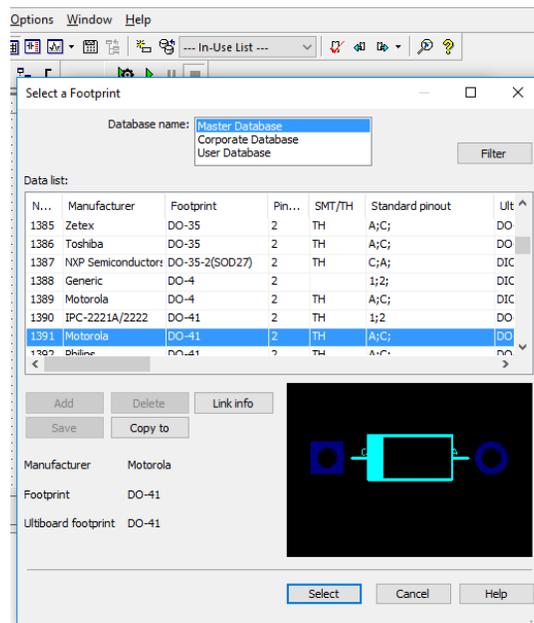


d.- Se presiona Select → Edit Footprint (aquí se muestra la Tabla de correspondencia entre los pines del símbolo y del footprint seleccionado) → ok → ventana BJT\_NPN → presionar ok, con lo que estaremos de nuevo en la ventana de trabajo del MULTISIM.

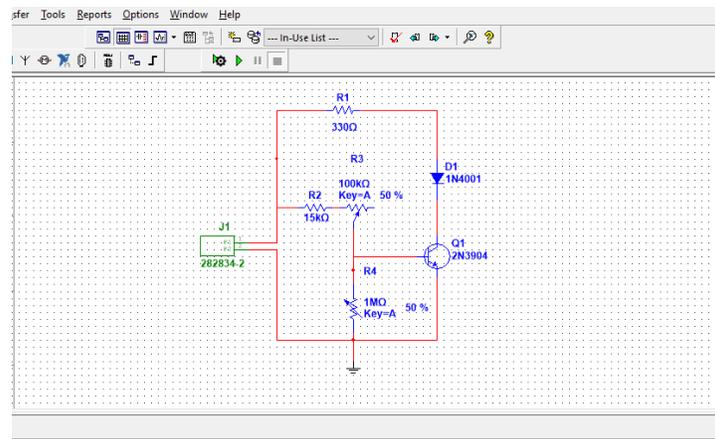
### 5.2.3.6 Procedimiento para asignar footprint al LED1.

Para el LED1 se usa el símbolo de un diodo normal, debido a que si se usa el símbolo de LED se presentan problemas para asignar su footprint. Se uso un diodo 1N4001, que físicamente las mismas características (aunque eléctricamente, no). Este diodo tiene asignado el footprints correspondiente DO41. Igual procedimiento:

- Se señala componente → clic derecho → properties → (Se abre la ventana DIODE y en la pestaña value) → presionar Edit footprint
- En Edit footprint → Select from Database → se muestra la ventana Select a Footprint
- En Select a Footprint buscar el footprint DO41 u otro similar.

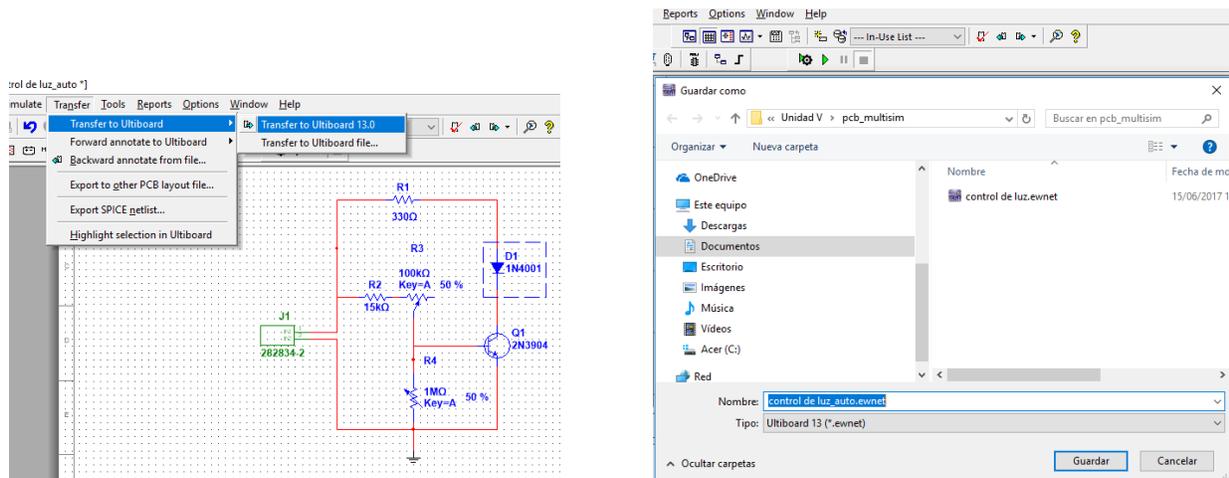


d.- Se presiona Select → Edit Footprint (aquí se muestra la Tabla de correspondencia entre los pines del símbolo y del footprint seleccionado) → ok → ventana DIODE → presionar ok, con lo que estaremos de nuevo en la ventana de trabajo del MULTISIM.



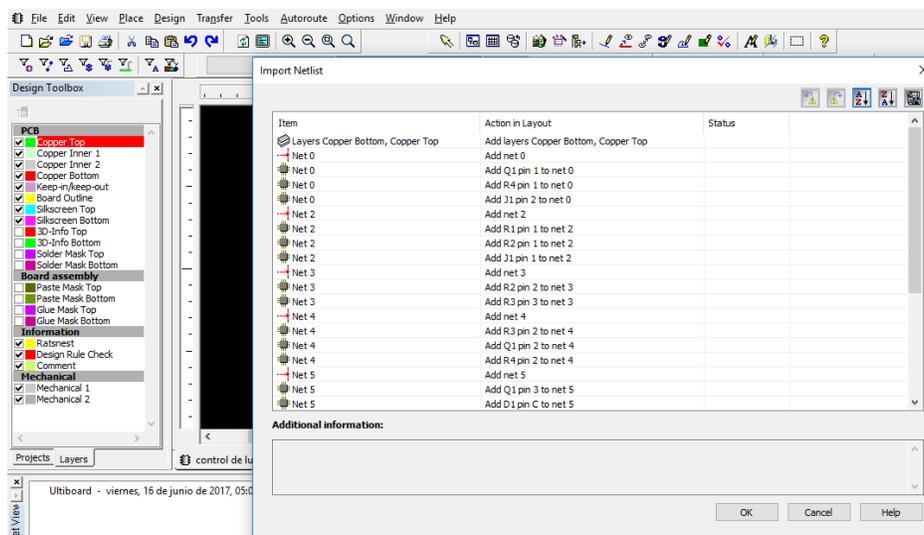
### 3.2.3.7 Transfiriendo de Multisim a Utilboard.

Se usa la ruta Transfer → Transfer to Ultiboard → Transfer to Ultiboard 13.0 → Aparece la ventana *Guardar como...*

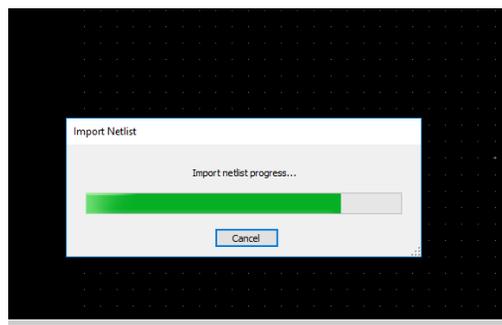


Presionar *Guardar*.

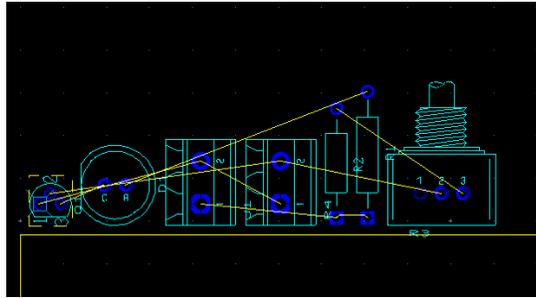
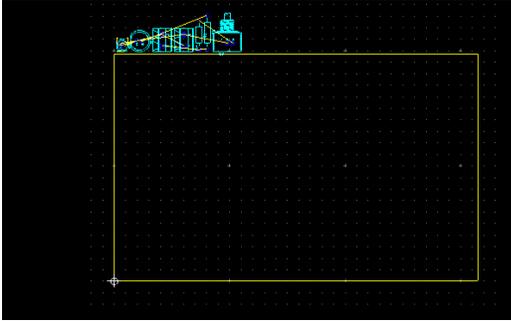
Se abre el software y aparece una lista de todos los componentes.



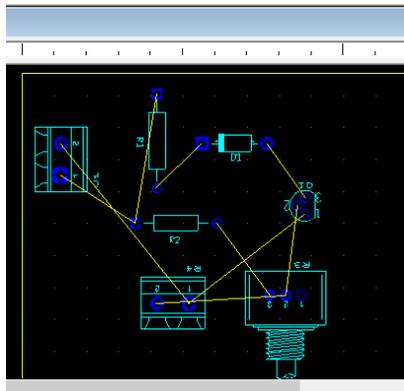
→OK.



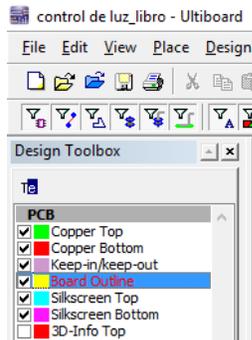
Aparecen todos los componentes que llevará el circuito



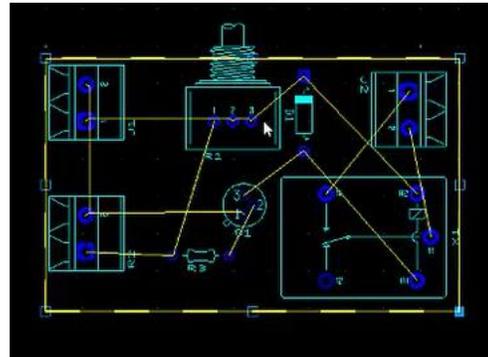
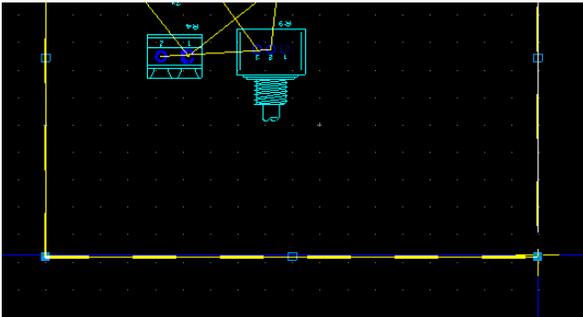
Colocamos los elementos dentro del área de la placa, procurando que las líneas de conexión se crucen lo menos posible. También los conectores y el potenciómetro deben quedar accesibles en los bordes de la placa.



Podemos ajustar el tamaño de la tarjeta. En la parte de la izquierda del tablero se tienen una serie de comandos *Design Toolbox*. Ahí seleccionamos y hacemos doble clic sobre *Board Outline*.



Hacemos clic sobre la línea amarilla del borde de la placa, con lo que queda señalada la línea amarilla de forma interrumpida, con marcas azules en los vértices, los cuales desplazamos hasta ajustar al tamaño deseado.



Para finalizar este proceso, hacemos clic fuera del área de placa.

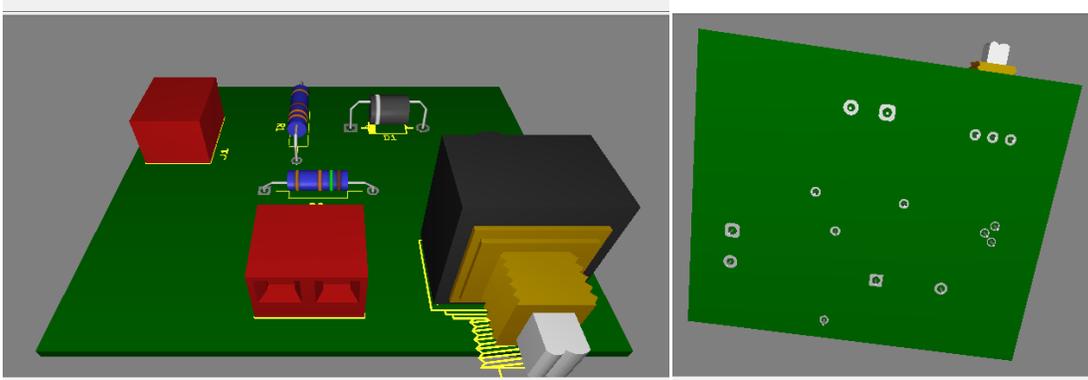
En esta parte podemos checar como se verán nuestros componentes en tercera dimensión.



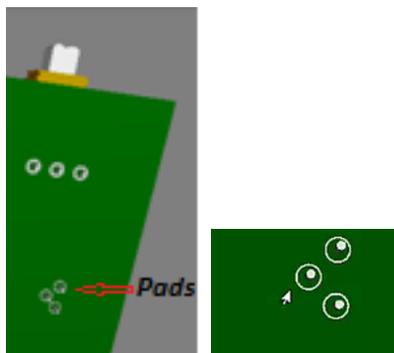
Para ello nos situamos en el icono , del menú de herramientas del programa.



Lo que nos muestra



Podemos ver la parte posterior de la placa, donde se muestra los agujeros y los anillos que conectan a los pines de los componentes del circuito. El aro que rodea a los pines se les llama islas (*pads*).



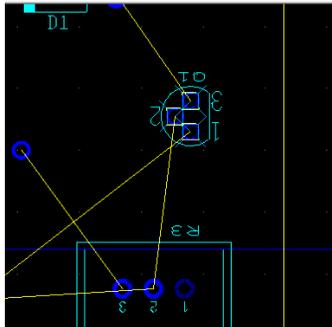
Si los arillos de los *pads* resultan muy delgados, podemos hacerlos más gruesos.

Para editar los pads, debemos seguir el procedimiento:

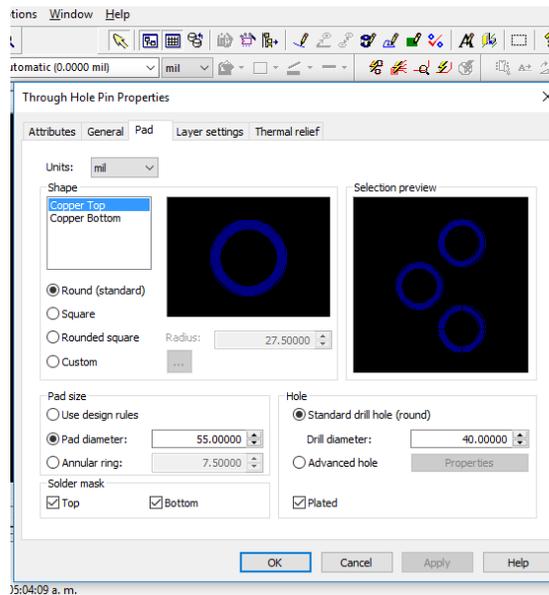
- 1.- Seleccionar todas las opciones de restricción de la barra de herramientas



- 2.- Luego, seleccionar los pads a modificar. Para seleccionar varios usamos "shift+flecha apuntadora"



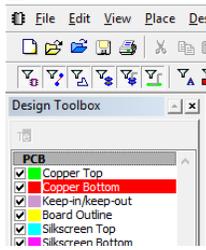
- 3.- Hacemos doble clic sobre alguno de los pad seleccionados, aparece la ventana



Vamos poner 30 mils en Hole →Drill diameter, y 60 mils en Pad size→ pad diameter. En seguida →OK.

- Trazado de pistas

Vamos a Design Toolbox→ Cooper Bottom



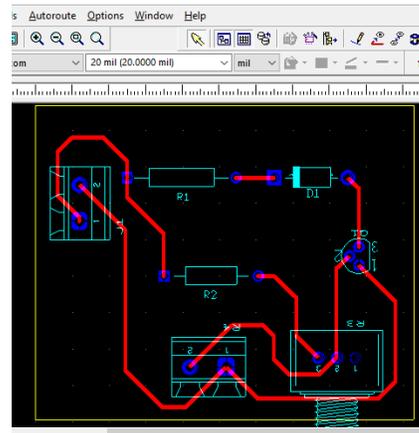
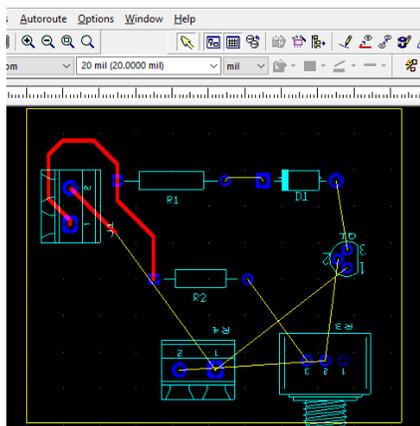
De automático tiene asignado el grosor de la pista en 10 mils.



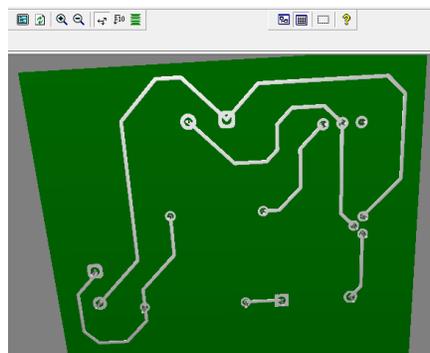
Presionamos el icono  de la barra de herramientas



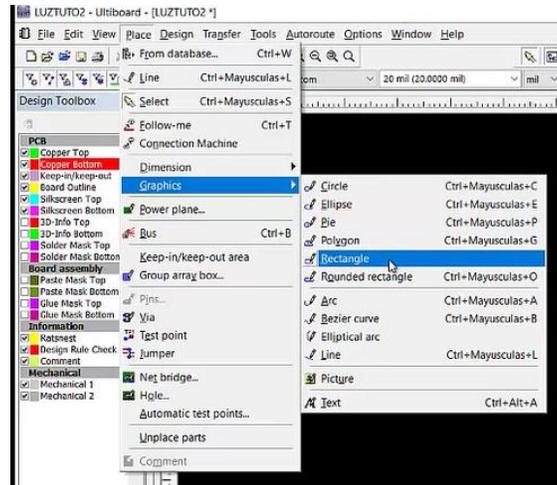
Y empezamos a trazar las pistas, haciendo clic en los pads, e ir arrastrando el puntero buscando la ruta más adecuada (que las pistas no se crucen).



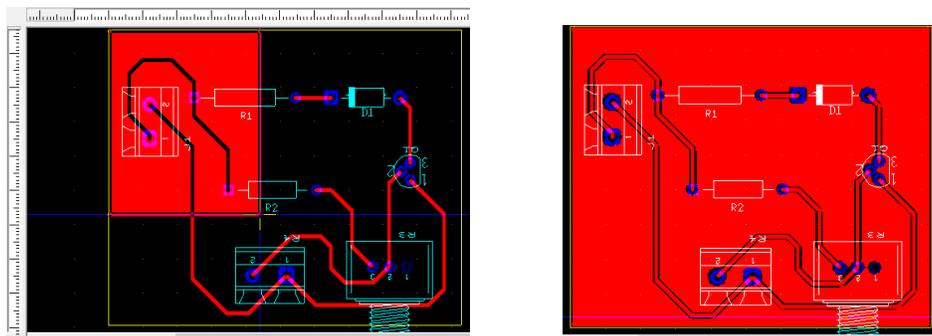
Podemos visualizar en 3d:



- Preparación para imprimir. Seleccionamos Place →Graphics →Rectangle



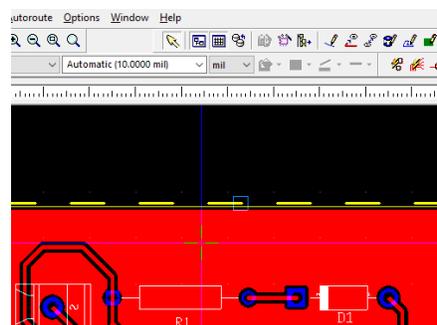
Comenzamos a trazar un rectángulo color rojo desde el vértice superior izquierdo del área de placa. Todo lo que está en rojo representa al cobre que quedara adherido a la placa. Las partes de color negro son zonas que se eliminarán bajo un proceso posterior. Las líneas entre zonas negras se les llaman pistas.



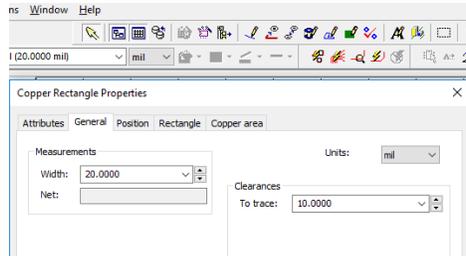
Al espacio que queda entre la pista (o un pad) y el resto de la placa de cobre no ocupada, se llama *clearance*. Se puede modificar su espesor si se desea que quede más grande. En este ejemplo lo vamos a separar a 20 mils.



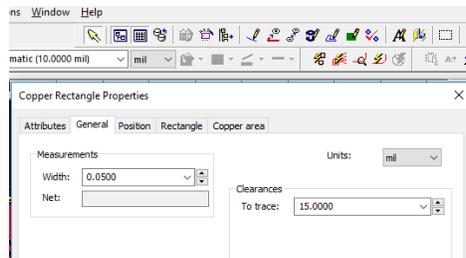
Se pone el cursor en la placa de cobre, se hace doble clic



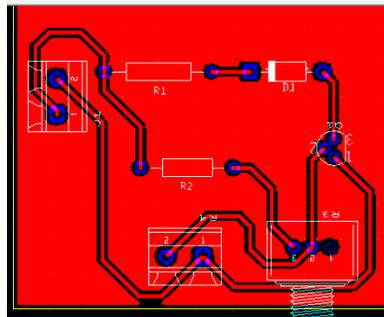
y aparece la ventana



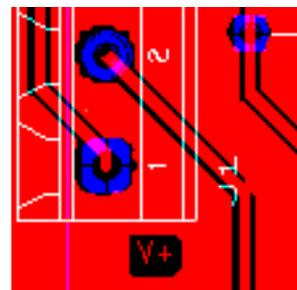
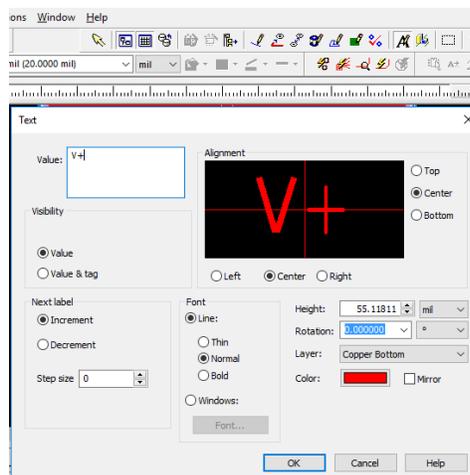
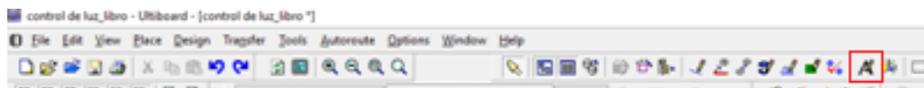
se cambia clearances a 15 mils



Apply →OK, y el clearance debe ser más grueso.

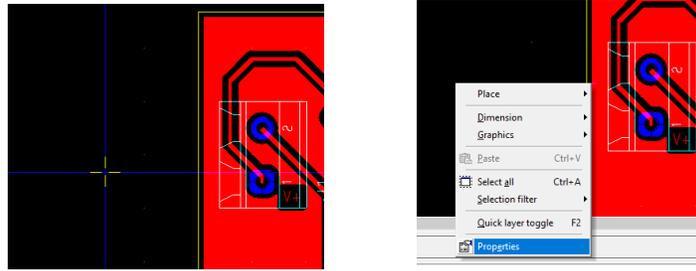


Podemos ingresar texto de algún mensaje. Presionamos el icono  de la barra de herramientas

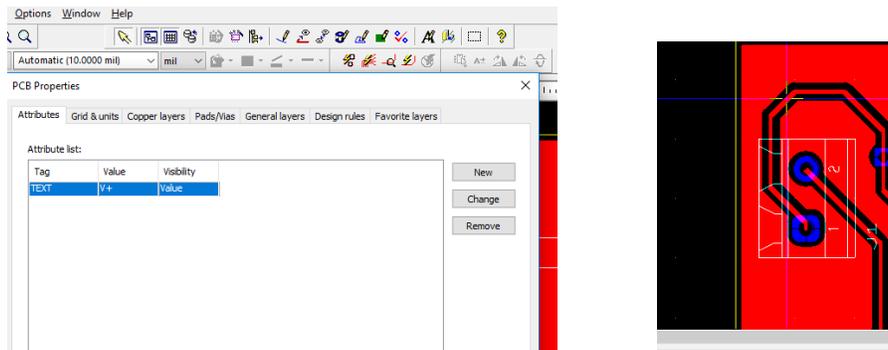


Ingresamos el texto →OK. Se ubica donde se desea, y listo.

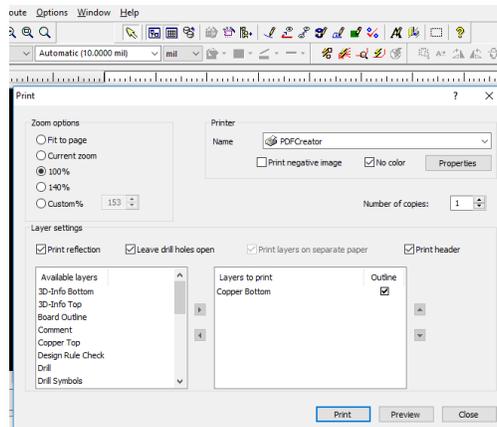
Para quitar el texto, se hace clic con el ratón derecho fuera de la placa → properties



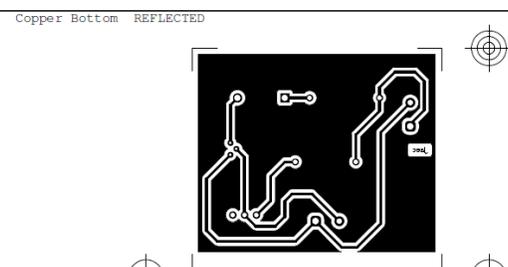
Nos resulta la ventana PCB Properties Attributes, donde en Attribute List se resalta TEX+(V+)+Value →Remove →Ok. Con esto habrá desaparecido el texto introducido.



Para imprimir presionamos el icono  del menú de archivos, por consecuencia se despliega la ventana



Una vez que se han requisitado los casilleros de acuerdo al modelo anterior, presionamos Print.



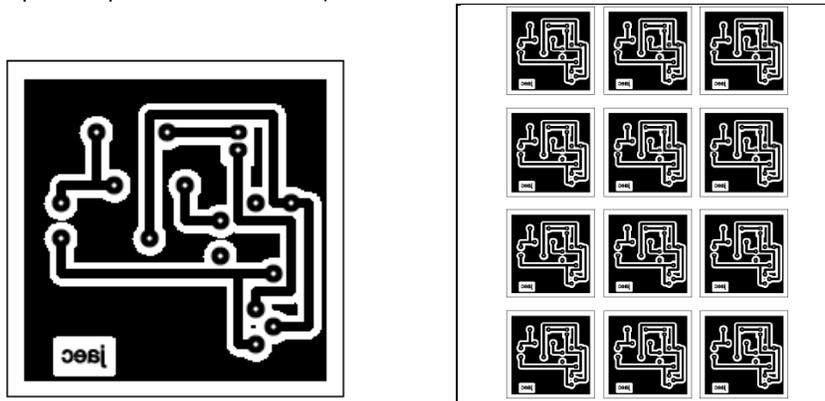
Con lo cual se ha terminado el diseño del fotolito utilizando ULTIBOARD de MULTISIM.

### 5.3. Técnicas básicas para la construcción de circuitos impresos.

#### 5.3.1. Impresión del fotolito en la placa de cobre.

En la gran mayoría de los procesos de fabricación de los PCB se incluye la impresión sobre la placa de cobre del fotolito previamente diseñado en la computadora. Lo impreso actuará como una máscara temporal, que ayudará a retirar el cobre no deseado dejando sólo las pistas de cobre protegidas.

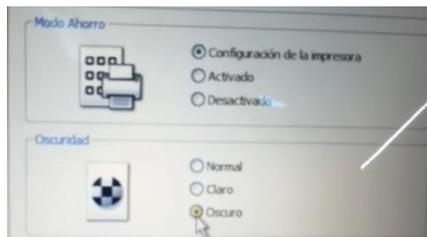
Se debe contar con el diseño del fotolito, realizado con algún programa tal como ya hemos mostrado en estas notas. Puede ser el PCB Wizard (Livewire) o el Ultiboard de Multisim. El circuito debe estar en un archivo pdf (para el PCB Wizard es la visualización "atwork"), configurado a imprimirse en el tamaño real del circuito. Si el tamaño del circuito lo permite, pueden ubicarse varias circuitos del mismo diseño, o si se tienen diferentes diseños pendientes, se pueden acomodar varios en una sola hoja (o también, si se tiene la necesidad de hacer varias replicas de circuito impreso a partir de un modelo).



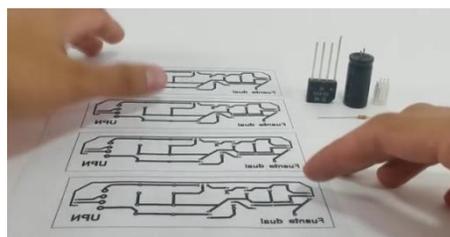
El circuito Atwork (El modelo o patrón a imprimir)

a) De la computadora al papel de impresión. Se deben usar hojas de papel que permitan fácilmente el desprendimiento del toner y que éste se adhiera a la placa de cobre [por ejemplo, hojas de transferencia Steren PNP-010, hojas de papel couche (es papel brillante, como el que se usa en las revistas), o también, hojas de acetato].

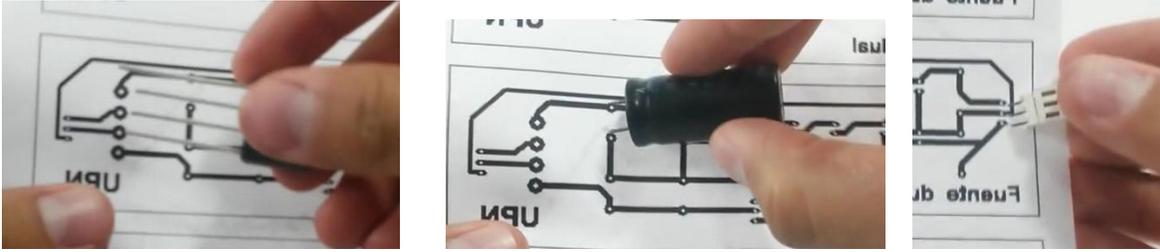
Se procede a imprimir la hoja, pero antes se debe configurar la calidad de la impresión. Deberá configurarse la impresora (debe ser impresora laser), para que imprima modo oscuro y use la opción de la calidad de impresión más alta (se consume mayor cantidad de toner). Por ejemplo, desactivar Modo de Ahorro, y la Oscuridad, debe tener marcado la opción Oscuro.



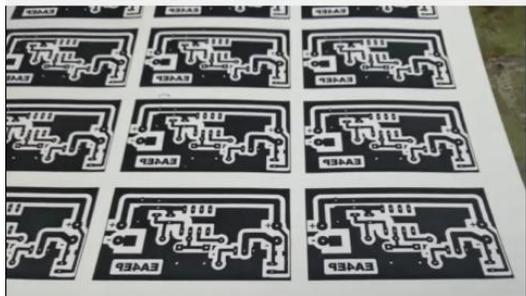
Se recomienda hacer una impresión de prueba (en una hoja de papel normal). Verificar si la impresión se hizo de forma directa o espejo, para evitar que las conexiones queden invertidas.



Checamos con los componentes físicos que la escala de impresión es correcta.



Luego de verificar que no existen anomalías en el diseño que se imprimirá finalmente, se procede a realizar la copia sobre un papel que permitirá la transferencia del fotolito a la placa de cobre.

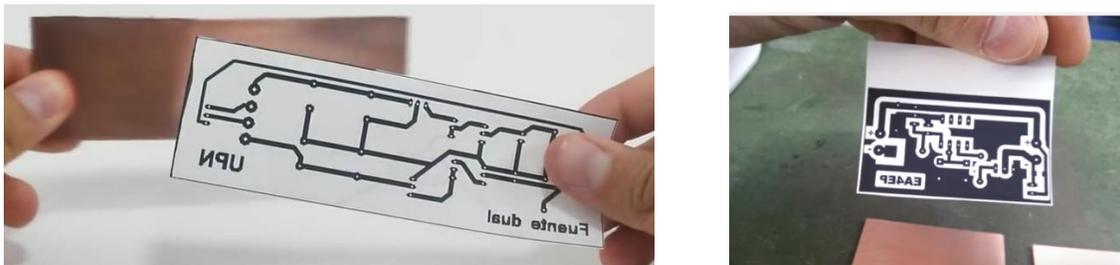


Verificamos que la impresión transferible no tenga fallas (las pistas deben aparecer bien marcadas por el toner, no tener discontinuidades por fallas de ausencia de toner).

Se cortan individualmente los circuitos impresos en el papel y ajuste de ellos sobre las placas de cobre.



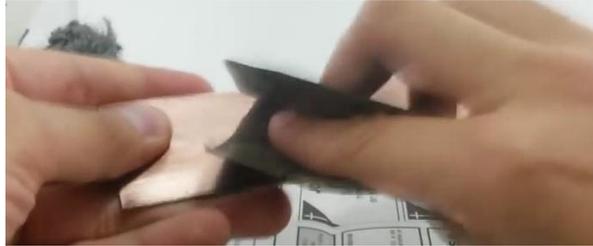
Después de marcar el tamaño y forma de la placa que se necesita, se hace el corte con la segueta. De este paso, obtenemos:



Se debe comprobar que el circuito este en modo espejo (lo cual lo muestra la etiqueta que tiene las letras al revés). Si es posible debe dejarse una especie de pestaña en uno de los costados, lo cual ayuda a manejar el impreso y evita que le pasemos grasa al tóner.

b) Preparación de la baquelita. La placa de baquelita debe ser sometida a un proceso de limpieza manual, para retirar cualquier presencia de polvo, grasa u otras irregularidades que impedirían la adherencia del tóner a la placa.

Se empieza con una lija para metal fina, se frota suavemente sobre la superficie de cobre.



Se continúa la limpieza pasando sobre la superficie un trapo de tela limpia impregnado con thinner (puede usarse alcohol o acetona).



Luego usamos una esponja de brillo (puede ser Scotch Brite).



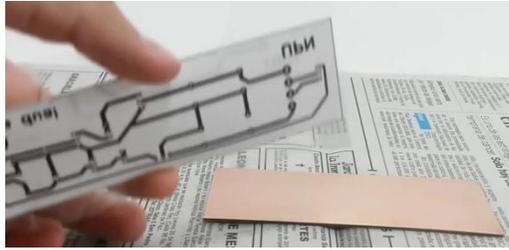
Se aplica nuevamente thinner con el trapo limpio.



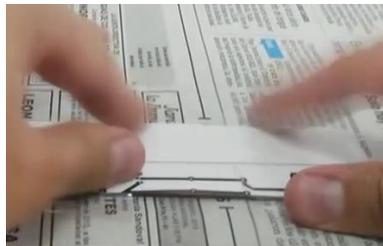
El resultado del trabajo de limpieza, muestra una placa brillante.



c) Planchado. Se inicia la colocación del circuito a imprimir sobre la superficie de la placa. Debe cuidarse de no tocar con los dedos la cara impresa con el toner ni la superficie de cobre.



Se asegura el circuito con cinta transparente.



Se prepara la plancha de uso doméstico, a temperatura alta.



Empieza el proceso de planchado. Colocamos sobre la placa papel periódico para evitar que se queme el circuito.



Se da el tiempo suficiente de planchado. Retiramos la placa:



Dejamos enfriar las tarjetas. Se sumerge la placa en un recipiente con agua. Remojar las tarjetas de 10 a 15 minutos.



Después, cuando se considere que ya se reblandeció el papel, se le retira del agua y comienza a quitarse el papel donde se imprimió el circuito.

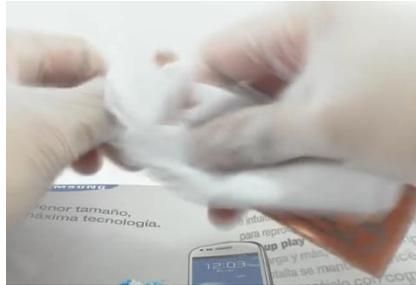


Al revisar el papel desprendido se observa que hay parte de toner que no se adhirió al cobre. Este detalle deberá ser corregido remarcando con el marcador de tinta permanente.

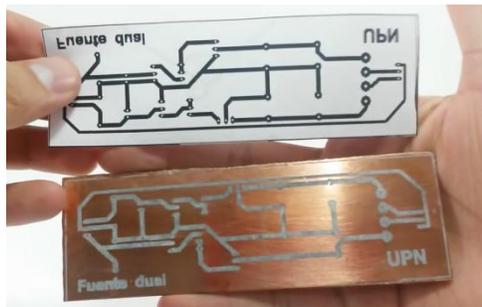
Se usa el cepillo para terminar de retirar los restos de papel.



Se seca con servilletas de papel o papel higiénico.



Debemos ver si el circuito ha quedado correctamente impreso a la placa, lo comparamos con el circuito patrón impreso inicialmente a la hoja.



Como existen partes que muestran deficiencias de impresión, procederemos a un remarcado con el plumón de tinta permanente, lo que evitará que el ataque químico quite el cobre donde se debe formar la pista.



Listo. Tenemos ya la placa preparada para la siguiente etapa que será el ataque químico.

### 5.3.2. Ataque químico.

El cobre que queremos que finalmente forme las pistas conductoras está cubierto con la tinta del marcador. La tinta funciona a modo de plástico protector. Si se mete la placa en una solución de **Cloruro Ferrico** (Fórmula:  $\text{FeCl}_3$ ) éste atacará químicamente al metal que no está protegido hasta alcanzar la baquelita.

a) Preparar la solución que atacará al cobre de la placa.

El cloruro férrico en estado sólido es de color amarillo naranja. Debe disolverse en un recipiente con agua (deberá agitarse continuamente hasta lograr una solución homogénea). Esta solución libera calor al producirse una reacción de tipo exotérmica. La solución obtenida es viscosa y de color ambar oscuro, altamente oxidante, ataca a los metales incluyendo al cobre.

La cantidad de agua que se usa es inversamente proporcional al tamaño del diseño y a la velocidad del ataque.

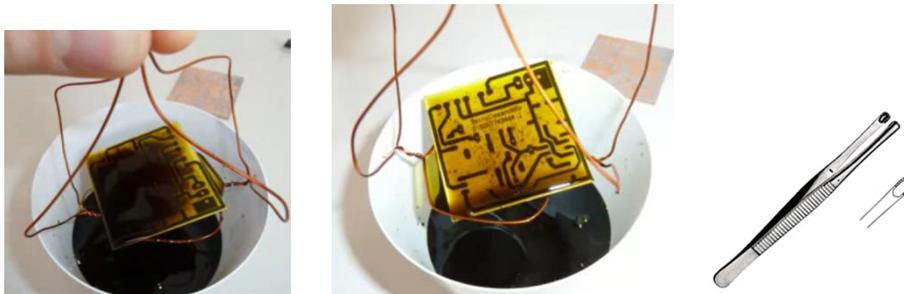


También es posible conseguirse soluciones ya preparadas, que para nuestros experimentos resultan una buena opción.



b) El ataque químico.

Se ilustra un portaplaca rústico hecho de alambre de cobre esmaltado que servirá para manipular el circuito dentro del recipiente con cloruro férrico. También puede usarse pinzas quirúrgicas.

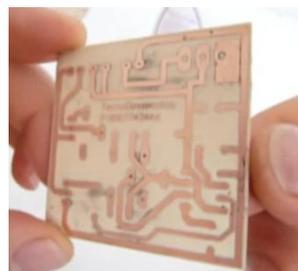
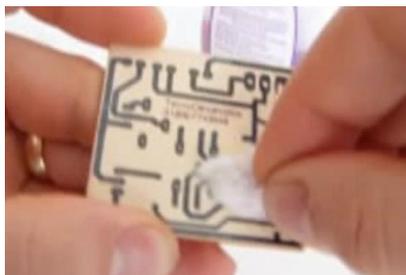




Cuando se observa que ya todo el cobre no necesario (no cubierto por la impresión de toner) ha sido eliminado, procederemos a la limpieza con agua para quitarle el ácido.



Ya lavada la placa se seca con un paño o con una servilleta de papel. Para limpiar o remover el toner de las pistas, necesitamos acetona o removedor de esmalte para uñas.



También se puede usar lija suave o esponja abrillantadora.

Podemos ver a otra placa que se ha sometido a un proceso similar:



También la limpieza de la tinta de las pistas puede hacerse con un borrador.



Limpiar con un paño los restos de la pintura del marcador.



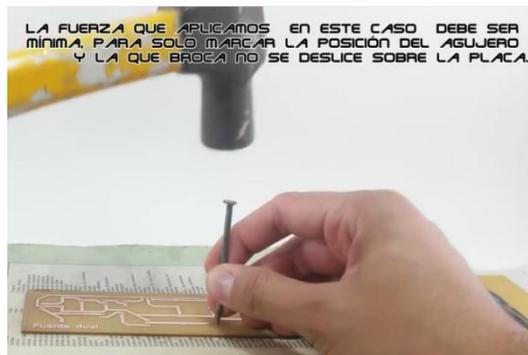
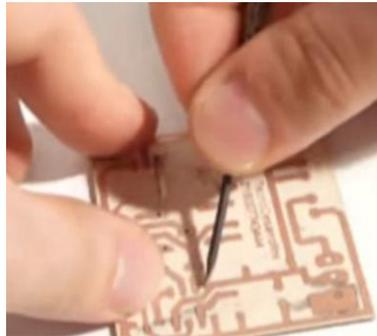
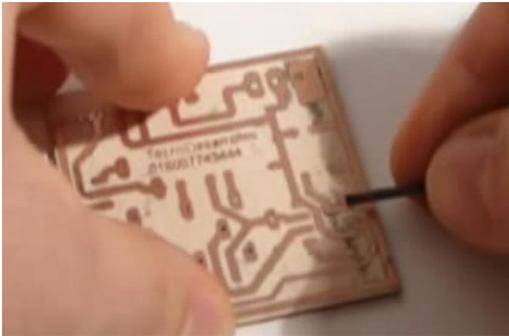
Placa terminada después del ataque químico



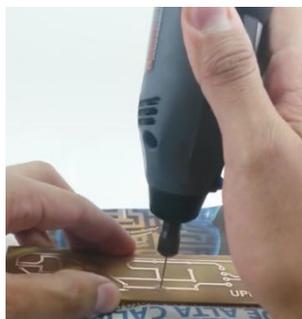
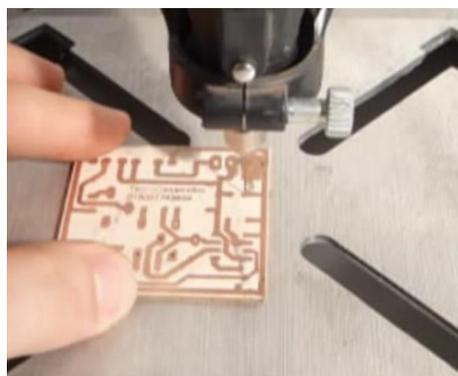
Se finalizado la preparación para la siguiente etapa que será taladrar sus agujeros en las islas (los *pads*) que recibirán los pines de los componentes físicos del circuito.

### 5.3.3. Punzonado y taladrado de los agujeros a perforar en las islas.

Para el barrenado de una tarjeta PCB, necesitamos principalmente: taladro, brocas, punzon, martillo y gafas. Para facilitar el perforado de los huecos, se marcan puntos (se "puntea") por medio de un punzón (puede ser un clavo de punta fina), en donde irán las perforaciones para que pasen los pines de los componentes del circuito.

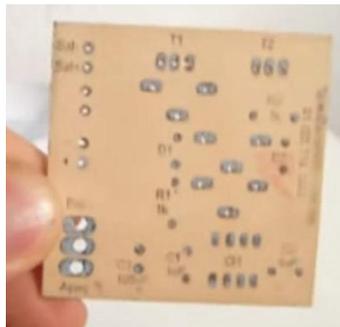
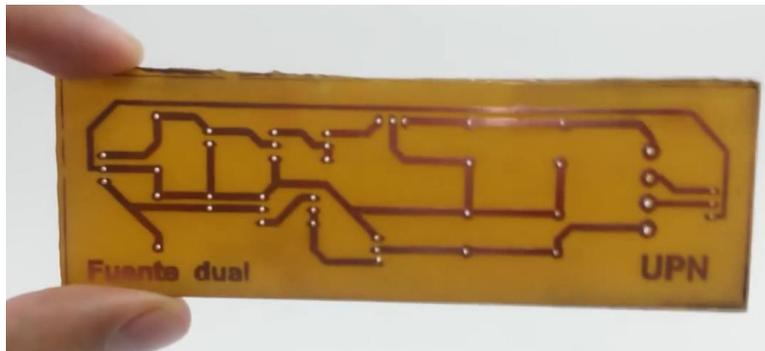


Posteriormente, se puede usar un taladro Drimel, ya sea de forma manual o montado en un soporte para taladro, con el que se realizarán las perforaciones de los agujeros. Se usan brocas muy delgadas, de 1/32 y 1/64 de pulgada.



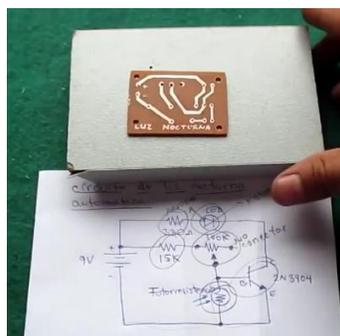
**Siempre utilice  
GAFAS de protección  
para sus OJOS...**

Este es el producto final de esta etapa:

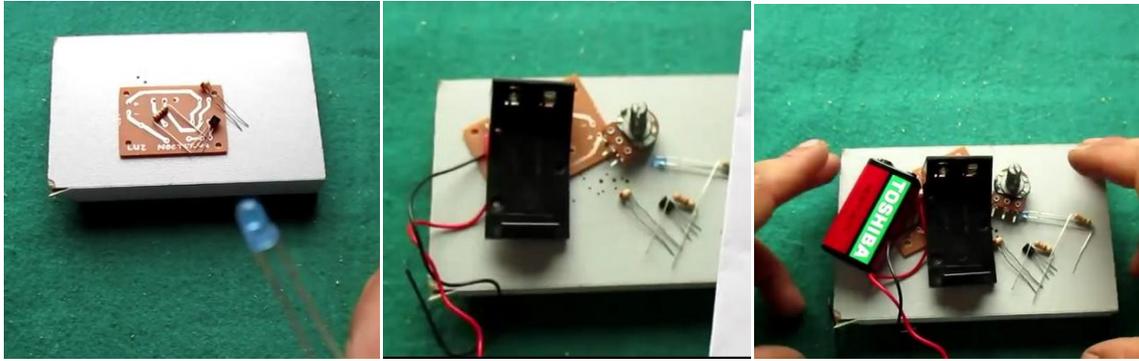


### 5.3.4 Ensamble de componentes.

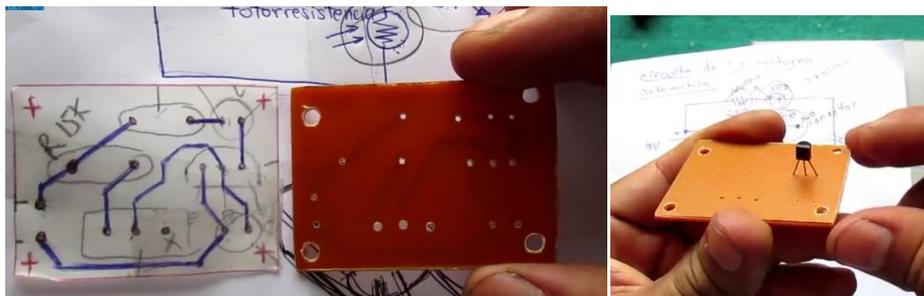
Con la placa PCB ya terminada con todas sus perforaciones necesarias, empezaremos la última etapa de su proceso de fabricación, que en el ensamblaje de sus componentes físicos. Junto con la placa debemos de tener un diagrama simbólico del circuito que se está construyendo.



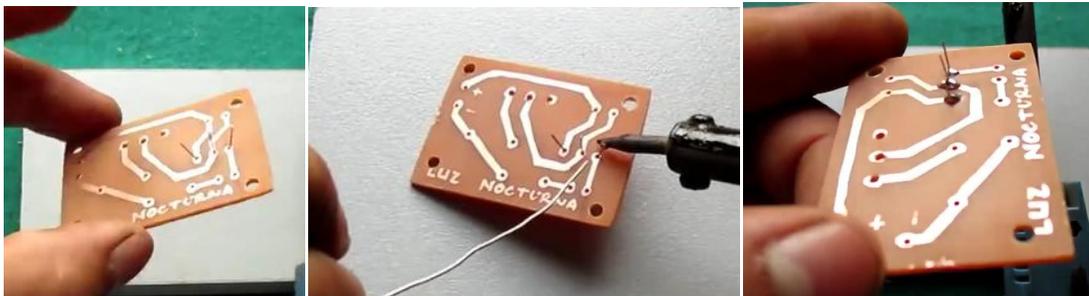
A continuación vamos acercando todos los componentes que intervienen en el circuito.



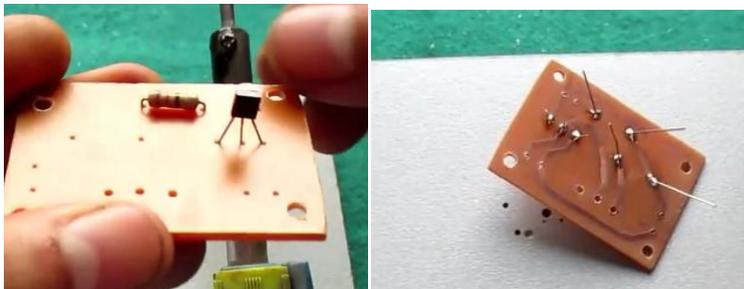
El primer elemento que se coloca es el transistor:



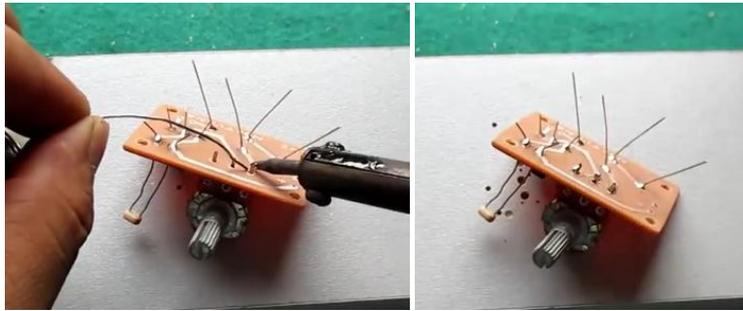
En la cara posterior se hace la soldadura.



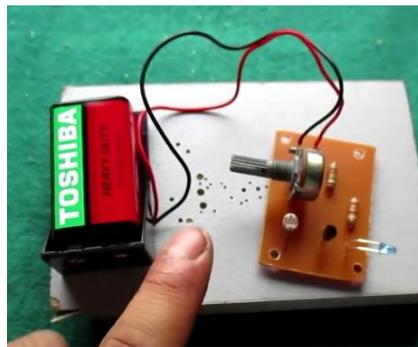
Siguen los otros componentes.



Soldando el potenciómetro.

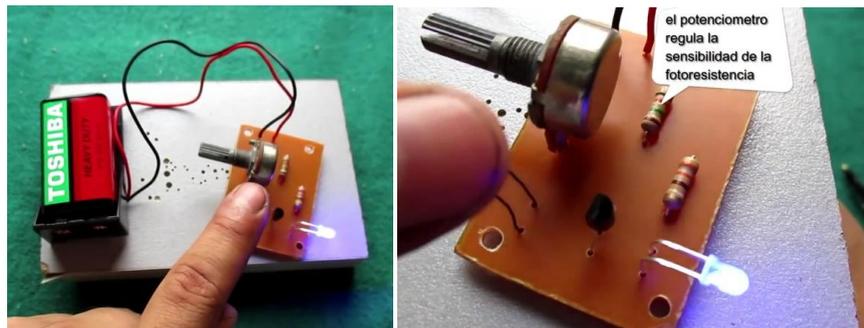


Se colocan los cables que conectan el portabatería y la batería.



### 5.3.5 Prueba del funcionamiento del circuito.

Finalmente se prueba el funcionamiento del circuito terminado en la etapa VI. Si se obstruye la entrada de luz a la fotoresistencia, enciende el LED.



De esta forma se ha concluido el proceso de construcción de un PCB de manera elemental, con ello se espera que el alumno tenga las bases para poder elaborar otros circuitos más complejos.

## BIBLIOGRAFÍA.

1. Bolton, Bill.  
*Mediciones y pruebas eléctricas y electrónicas.*  
Marcombo. Barcelona. 1995
2. Boylestad, Robert L. & Nashelsky, Louis  
*Electrónica. Teoría de Circuitos.*  
Prentice-Hall Mexicana.
3. Cooper, William David & Helfrick, Albert.  
*Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición.*  
Ed Prentice Hall 1991.
4. Dawes, Chester L.  
*Electricidad Industrial.*  
Editorial Reverte, S.A. Barcelona. 1981.
5. Edminister, Joshep A.  
*Circuitos eléctricos.*  
Mc. Graw- Hill. Schaum.
6. Floyd, Thomas L.  
*Principios de circuitos eléctricos.*  
Pearson Educación, México, 2007.
7. Frank, Ernest.  
*Análisis de medidas eléctricas.*  
Editorial Mc Graw Hill. 1969.
8. Hayt, William H. & Kemmerly, Jack  
*Análisis de circuitos en ingeniería.*  
Ed. McGraw Hill, 2a. Edición.
9. Resnick, R. & Halliday, D.  
*Física. Volumen I y II.*  
Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. 1994.
10. Ruiz Vassallo, Francisco.  
*Manual de instrumentos de electrónicos medida.*  
Editorial CEAC. 1993
11. Stanley, Wolf & Richard, Smith.  
*Guía para mediciones electrónicas y prácticas de laboratorio.*  
Ed. Prentice Hall 1992.
12. Manual del propietario de los osciloscopios disponibles
13. Manuales del usuario de medidores usados en el laboratorio de la Institución.
14. Manuales de fabricación de circuitos impresos

## Contenido

Unidad 5.....	324
Diseño y elaboración de tarjetas de circuitos impresos. ....	324
5.1. Introducción a los circuitos impresos.....	324
5.1.1. Diseño del proyecto. ....	324
5.1.2. Elección o diseño del circuito.....	325
5.1.3. Consecución de materiales. ....	325
5.1.4. Ensayo en protoboard.....	326
5.1.5. Diseño y elaboración del circuito impreso (PCB). ....	326
5.1.5.1. Descripción de la placa de cobre para PCB. ....	326
5.1.5.2. Técnicas para el diseño del fotolito para circuitos impresos. ....	328
5.1.5.3. Técnica de grabado directo a la placa con marcador de tinta permanente. ....	328
5.1.5.4 Recomendaciones:.....	329
5.1.5.5 Normas.....	329
5.1.5.6 Recursos Especiales... El Jumper (o puente).....	331
5.1.6. Ensamble de componentes. ....	332
5.1.7. Pruebas y corrección de fallas del PCB.....	332
5.2. Diseño de PCB mediante software.....	333
5.2.1. Diseño del fotolito del circuito denominado <i>Luz nocturna automática</i> usando la técnica del marcador de tinta indeleble. ....	333
5.2.2 Diseño del fotolito con <i>PCB Wizard</i> de <i>Livewire</i> . ....	340
5.2.2.1 La ventana de entrada del programa. ....	340
5.2.2.2 Realización de esquemas. ....	341
5.2.2.3 Diseño de un circuito impreso a partir de un esquema. ....	344
5.2.2.4 Cambio del modelo de un componente.....	344
5.2.2.5 Otras opciones para el diseño con el PCB-Wizard.....	347
5.2.2.6 Modificación de un circuito.....	351
5.2.2.6.1 Mover o girar componentes: .....	351
5.2.2.6.2 Modificar el grosor de las pistas: .....	352
5.2.2.6.3 Modificar el tamaño y forma de un circuito:.....	352
5.2.2.6.4 Insertar texto, objetos y relación de componentes: .....	353
5.2.2.7 Resumen de lo obtenido mediante <i>PCB WIZARD</i> . ....	353
5.2.3 Diseño del fotolito con <i>Ultiboard</i> de <i>Multisim</i> . ....	353
5.2.3.1 Asignación de footprint para el conector J1: .....	355
5.2.3.2 Ahora el potenciómetro R3 lo vamos asociar con POTI3M, bajo el mismo procedimiento. ....	357

5.2.3.3 Procedimiento para asignar footprint a R4. ....	358
5.2.3.4 Procedimiento para asignar footprint a R1 y R2. ....	359
5.2.3.5 Procedimiento para asignar footprint al transistor Q1. ....	360
5.2.3.6 Procedimiento para asignar footprint al LED1. ....	360
3.2.3.7 Transfiriendo de Multisim a Utilboard. ....	362
5.3. Técnicas básicas para la construcción de circuitos impresos. ....	370
5.3.1. Impresión del fotolito en la placa de cobre. ....	370
5.3.2. Ataque químico. ....	376
5.3.3. Punzonado y taladrado de los agujeros a perforar en las islas. ....	379
5.3.4 Ensamble de componentes. ....	380
5.3.5 Prueba del funcionamiento del circuito. ....	382
BIBLIOGRAFÍA. ....	383