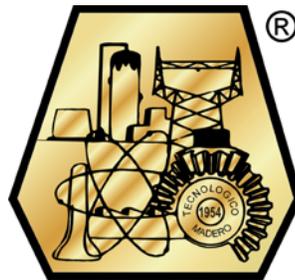


DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO
DETECTOR DE PRESENCIA/AUSENCIA DE
VOLTAJE PARA BAJA, MEDIA Y ALTA TENSIÓN”**

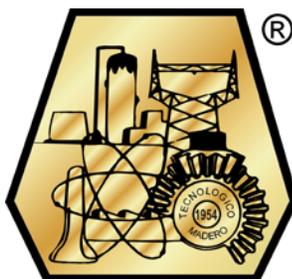
TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:
ING. RODRIGO GARCÍA REYES

DIRECTOR DE TESIS:
M.C. AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO
DETECTOR DE PRESENCIA/AUSENCIA DE
VOLTAJE PARA BAJA, MEDIA Y ALTA TENSIÓN”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:

ING. RODRIGO GARCÍA REYES

MIEMBROS DEL JURADO

PRESIDENTE:	M.C. AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
SECRETARIO:	M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
VOCAL:	M.C. HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS
SUPLENTE:	DR. GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ



"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Cd. Madero, Tamps; a **02 de Marzo de 2015.**

OFICIO No.: U2.059/15
AREA: DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

C. ING. RODRIGO GARCÍA REYES.
NO. DE CONTROL 606071449
PRESENTE

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE :	M.C. AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
SECRETARIO :	M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
VOCAL :	M.C. HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS
SUPLENTE:	DR. GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS : M.C. AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DETECTOR DE PRESENCIA/AUSENCIA DE VOLTAJE PARA BAJA, MEDIA Y ALTA TENSIÓN"

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta, esperando que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE
"Por mi patria y por mi bien"®

M. P. María Yolanda Chávez Cinco
M. P. MARÍA YOLANDA CHÁVEZ CINCO
JEFA DE LA DIVISIÓN



c.c.p.- Minuta
Archivo
MYCHC 'HCV' jar

f d



AGRADECIMIENTOS:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios de posgrado.

A la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, por brindarme la oportunidad de realizar mi maestría.

A todo el cuerpo académico de la Maestría en Ingeniería Eléctrica, por su apoyo, ejemplo y conocimiento.

Al M. C. Samuel Vega Leal, Gerente de Iberdrola Región Altamira, al Ing. José Refugio Nieblas Sotomayor, Jefe del Departamento de Mantenimiento Eléctrico de la Central de Ciclo Combinado Altamira III y IV de Iberdrola, a todo el cuerpo técnico de dicha central, Rosalía Alvarado, Pedro Mares, Gaspar Díaz, Lino Hernández; por el apoyo y las facilidades para realizar las estancias de posgrado y las pruebas de este proyecto.

Especialmente, a mi asesor, el M. C. Aarón González Rodríguez por su apoyo, dedicación y contribución para la realización de este trabajo de tesis.

Ing. Rodrigo García Reyes.

DEDICATORIAS:

A mis padres:

Prof. Pedro García Hernández

Prof. ^a Francisca Reyes García

Por su eterno amor, ejemplo y apoyo incondicional.

A mis hermanos, Prof. ^a Yadiralia García Reyes y Teniente Pedro García Reyes, por sus consejos, apoyo y momentos de alegría.

Especialmente a mis sobrinos, Cassandra Deyadira, Pedro Luis, Jesús Rodrigo y Hermann, que tomen como ejemplo, el trabajo, esfuerzo y dedicación, para que lo enfoquen en su vida y puedan realizar su camino como personas de bien.

A demás familiares y amigos.

Ing. Rodrigo García Reyes.

Diseño y construcción de un prototipo detector de presencia/ausencia de voltaje para baja, media y alta tensión.

Ing. Rodrigo García Reyes.

Resumen

Este trabajo plantea el diseño y construcción de un prototipo detector de voltaje para baja, media y alta tensión, el cual representa una mejora de funcionamiento con respecto a los dispositivos comerciales para el mismo propósito, ya que, aunado al módulo detector basado en el sensado de campo eléctrico, se integró un módulo de radiofrecuencia para transmitir la señal de control a cierta distancia, en la zona de seguridad y en la cercanía del operador, donde el correspondiente receptor activará la señal de alarma mediante su salida auditiva y visual. Esta característica es muy útil debido a que los dispositivos comerciales actuales manejan la señal de alarma integrada en un mismo módulo, lo que representa un problema a la hora de trabajar en ambientes muy ruidosos, donde además por normativas de seguridad en instalaciones industriales, es obligatorio el uso de protección auditiva, o donde la luz solar represente ciertas desventajas visuales como encandilamientos al mirar hacia equipos energizados elevados donde se requiera verificar la presencia o ausencia de voltaje, todas estas desventajas se eliminan con este nuevo diseño, de esta forma se podrá realizar la verificación de la presencia/ausencia de voltaje de una forma más eficiente y segura.

Se presentan también los resultados experimentales realizados en la Central de Ciclo Combinado (C. C. C.) Altamira III y IV de Iberdrola Energía Altamira S.A. de C.V., como parte de la estancia de posgrado en coordinación con el Jefe del Departamento de Mantenimiento Eléctrico, Ing. José Refugio Nieblas Sotomayor, donde se pudieron realizar pruebas en los siguientes niveles de tensión: 480 V, 4160 V y 400 kV, comprobando la validez de la implementación de este prototipo.

Design and construction of a prototype detector presence/absence of voltage for low, medium and high tension.

Engineer Rodrigo García Reyes.

Abstract

This work proposes the design and construction of a detector prototype of voltage for low, medium and high tension. The prototype represents an improvement compared to commercial devices having the same purpose, since, in addition to the detector module based on the electric field sensing, a radiofrequency module was integrated for transmitting the control signal at a given distance, within the security zone and near the operator, where the corresponding receptor activates the alarm signal through its auditory and visual output. This feature is very useful because to date similar commercial devices handle the alarm signal integrated in a single module, which represents a problem when working in noisy environments. For example, according to safety regulations in industrial installations, the use of hearing protection is mandatory. Furthermore, sunlight would represent certain visual handicaps when it is required to verify the presence or absence of voltage in energized equipments in an elevated position. All these disadvantages are eliminated with this new design; thus, the verification of the presence/absence of voltage can be performed more efficiently and safely.

The experimental results obtained at the Combined Cycle Central, Altamira III and IV of Iberdrola Energía Altamira S.A. de C.V. are presented as part of the graduate stay in coordination with the head of the department of electrical maintenance, M. José Refugio Nieblas Sotomayor, the tests were performed there at the following tension levels: 480 V, 4160 V and 400 kV, proving the validity of the implementation of this device.

Contenido

	<i>Página</i>
Agradecimientos.....	i
Dedicatorias.....	ii
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Contenido.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	xii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.3.1. Accidente 1. Quien iba a imaginarse.....	5
1.3.2. Accidente 2. Aparentemente el operador se aisló de acuerdo a las normas de protección vigentes.....	5
1.3.3. Accidente 3. Un cliente casi mata a varios linieros.....	6
1.4. OBJETIVOS.....	8
1.4.1. Objetivo general.....	8
1.4.2. Objetivo específico.....	8
1.5. HIPÓTESIS.....	9
1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	10
1.6.1. Alcances.....	10
1.6.2. Limitaciones.....	10
Capítulo 2. Marco teórico.....	11
2.1. SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL.....	12
2.2. INSTRUMENTACIÓN DE MEDICIONES ELÉCTRICAS.....	13
2.3. CAMPO ELÉCTRICO.....	14
2.4. DEFINICIÓN DE CAMPO ELÉCTRICO.....	15
2.5. DEFINICIÓN MEDIANTE LA LEY DE COULOMB.....	16
2.6. DEFINICIÓN FORMAL.....	18
2.7. DESCRIPCIÓN DE CAMPO ELÉCTRICO.....	19
2.7.1. Ley de Gauss.....	19
2.7.2. Ley de Faraday.....	20
2.8. LÍNEAS DE CAMPO.....	21
2.9. ENERGÍA DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	22

	<i>Página</i>
2.10. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO.....	23
2.11. INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	23
2.11.1. Definición matemática.....	24
2.12. ANTENAS.....	24
Capítulo 3. Interacción de campos eléctricos.....	26
3.1. COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DE MATERIALES EN PRESENCIA DE CAMPO ELÉCTRICO.....	27
3.2. CARACTERÍSTICAS ESPACIALES Y ESTABILIDAD TEMPORAL...	28
3.3. EL CONTENIDO DE ARMÓNICOS Y TRANSITORIOS.....	29
3.4. EFECTOS PRODUCIDOS POR EL CAMPO ELÉCTRICO DE LÍNEAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	30
3.4.1. Corrientes inducidas.....	30
3.4.2. Percepción del campo eléctrico por las personas.....	31
3.5. CAMPO ELÉCTRICO BAJO LÍNEAS DE TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	32
3.6. CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO A UN CONDUCTOR CONSIDERANDO EL EFECTO TIERRA.....	34
3.7. CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO A VARIOS CONDUCTORES CONSIDERANDO EL EFECTO TIERRA.....	36
3.8. CAMPO ELÉCTRICO A NIVEL DEL SUELO.....	38
3.9. CAMPO ELÉCTRICO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	38
3.9.1. Método Instantáneo.....	39
3.9.2. Método Fasorial.....	42
3.10. PERFIL DEL CAMPO BAJO UNA LÍNEA DE TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA A UNA ALTURA DETERMINADA.....	43
3.11. RECOMENDACIONES INTERNACIONALES DE CAMPO ELÉCTRICO.....	44
Capítulo 4. Fundamentos electrónicos.....	45
4.1. AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN.....	46
4.2. AMPLIFICADORES OPERACIONALES.....	49
4.3. CIRCUITO SEGUIDOR DE TENSIÓN.....	52
4.4. CIRCUITO RECTIFICADOR DE PRECISIÓN.....	53
4.5. CIRCUITO COMPARADOR.....	55
4.6. MÓDULO DE RADIOFRECUENCIA.....	57
4.7. LA ANTENA DEL TRANSMISOR Y DEL RECEPTOR.....	60

	<i>Página</i>
Capítulo 5. Desarrollo del proyecto.....	62
5.1. DESCRIPCIÓN DEL DETECTOR DE PRESENCIA/AUSENCIA DE VOLTAJE PARA BAJA, MEDIA Y ALTA TENSIÓN.....	63
5.2. ELEMENTO DETECTOR.....	65
5.3. ACOPLAMIENTO DE IMPEDANCIAS.....	65
5.4. ETAPA DE AMPLIFICACIÓN.....	66
5.5. ETAPA DE MANIPULACIÓN DE LA SEÑAL.....	69
5.6. CIRCUITO RECTIFICADOR DE PRECISIÓN.....	70
5.7. CIRCUITO COMPARADOR.....	71
5.8. ETAPA DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN EN RADIOFRECUENCIA.	72
5.8.1. Módulo transmisor.....	73
5.8.2 Módulo receptor.....	74
Capítulo 6. Resultados.....	82
6.1. PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	83
6.2. PRUEBAS DE CAMPO REALIZADAS.....	84
6.2.1 Pruebas en alta tensión	84
6.2.2 Pruebas en media tensión.....	87
6.2.3 Pruebas en baja tensión.....	90
Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones.....	93
7.1. CONCLUSIONES.....	94
7.2. RECOMENDACIONES.....	94
Referencias.....	97
Apendice A. Manual de operación.....	99

Lista de figuras

	<i>Página</i>
Figura 2.1. Campo eléctrico producido por un conjunto de cargas puntuales.....	15
Figura 2.2. Campo eléctrico de una distribución lineal de carga.....	17
Figura 2.3. Líneas de campo eléctrico correspondientes a cargas iguales y opuestas, respectivamente.....	22
Figura 3.1. Campo en un punto debido a una línea aislada.....	32
Figura 3.2. Dirección de campo debido a una carga q positiva.....	33
Figura 3.3. Campo eléctrico en un punto debido a un conductor considerando el efecto tierra.....	34
Figura 3.4. Campo eléctrico de n líneas en un determinado punto A.....	37
Figura 3.5. Campo eléctrico a nivel del suelo.....	38
Figura 3.6. Campo eléctrico en el punto A en diferentes instantes.....	42
Figura 3.7. Zona de estudio del perfil de campo.....	43
Figura 3.8. Línea de transporte de energía eléctrica en terrenos no planos.....	44
Figura 4.1. Amplificador de instrumentación.....	47
Figura 4.2. Configuración clásica de 3 Amplificadores operacionales (AO).....	47
Figura 4.3. Configuración del amplificador diferencial.....	48
Figura 4.4. Amplificador operacional.....	49
Figura 4.5. Configuración seguidor de tensión y su circuito equivalente ideal.....	52
Figura 4.6. Circuito rectificador de media onda básico o superdiodo.....	53
Figura 4.7. Circuitos equivalentes del rectificador de media onda básico para entradas a) positivas y b) negativas.....	54
Figura 4.8. Comparador No inversor: a) Circuito elemental y b) Respuesta del circuito.....	56
Figura 4.9. Comparador inversor: a) Circuito elemental y b) Respuesta del circuito.....	56

	<i>Página</i>
Figura 4.10. Comparador con $V_{ref} \neq 0$: a) Circuito elemental y b) Respuesta del circuito.....	57
Figura 4.11. Modulo de radiofrecuencia (RF).....	58
Figura 4.12. Modulaci3n de la se1al portadora.....	59
Figura 5.1. Diagrama a bloques del prototipo detector de presencia/ausencia de voltaje.....	64
Figura 5.2. Diagrama del amplificador de instrumentaci3n INA121 de BURR-BROWN.....	66
Figura 5.3. Conexiones b1sicas y representaci3n simplificada del INA121.....	67
Figura 5.4. Circuito para obtener una fuente bipolar utilizando el integrado LMC7660.....	68
Figura 5.5. Conexi3n t3pica y diagrama de conexiones del TL082.....	70
Figura 5.6. Configuraci3n t3pica para un rectificador de precisi3n de media onda...	71
Figura 5.7. Conexi3n t3pica para un regulador ajustable de 1.2 a 25 V.....	72
Figura 5.8. Esquema b1sico de un modulo transmisor en RF utilizando un codificador HT12E.....	74
Figura 5.9. Esquema b1sico de un modulo receptor en RF utilizando un decodificador HT12D.....	75
Figura 5.10. Diagrama general del prototipo detector de presencia/ausencia de voltaje para baja, media y alta tensi3n.....	76
Figura 5.11. Esquema general de las pistas del prototipo detector vista inferior....	77
Figura 5.12. Esquema general de las pistas del prototipo detector vista superior....	77
Figura 5.13. Diagrama general etapa de salida del prototipo detector.....	78
Figura 5.14. Esquema general de las pistas del circuito de salida vista inferior.....	78
Figura 5.15. Esquema general de las pistas del circuito de salida vista superior.....	79
Figura 5.16. Circuito impreso en placa de cobre.....	79
Figura 5.17. Primera etapa de aplicaci3n de acido y perforaci3n del circuito.....	80

	<i>Página</i>
Figura 5.18. Circuito impreso listo para colocación y soldado de los componentes electrónicos.....	80
Figura 5.19. Vista interior de etapa principal con componentes electrónicos soldados, montado sobre su gabinete plástico.....	81
Figura 5.20. Vista interior de etapa de salida con componentes electrónicos soldados, montado sobre su gabinete plástico.....	81
Figura 6.1. Bahía 400 kV SE Altamira III y IV.....	85
Figura 6.2. Prueba del dispositivo detector, comprobando la oportuna detección de voltaje, S. E. 400 kV Altamira III y IV, cuchilla A3511 fase C.....	86
Figura 6.3. Prueba del dispositivo detector a 2 m. de la base de la cuchilla, donde se puede comprobar la selectividad del dispositivo en el rango de alta tensión al no detectar voltaje, S. E. 400 kV Altamira III y IV, cuchillas A3511 fase C.....	86
Figura 6.4. Prueba del dispositivo detector entre las fases B y C de las cuchillas ATC A3511 donde se puede comprobar la selectividad del dispositivo en el rango de alta tensión al no detectar voltaje, S. E. 400 kV Altamira III y IV.....	87
Figura 6.5. Prueba del dispositivo detector en el lado de contactos hacia el equipo 241-P-0100AM, el cual estaba fuera de servicio y se verificó correctamente la ausencia de tensión de la fase B en 4.16kV.....	88
Figura 6.6. Prueba del dispositivo detector en el lado bus del tablero, el cual estaba energizado y se verificó correctamente la presencia de tensión en la fase B en 4.16kV.....	88
Figura 6.7. Prueba del dispositivo detector en el lado bus entre las fases B y C, demostrando la selectividad del dispositivo para detectar oportunamente la presencia/ausencia de voltaje específicamente sobre la fase de interés.....	89
Figura 6.8. Prueba del dispositivo detector en el lado bus del tablero, el cual estaba energizado y se verificó correctamente la presencia de tensión en la fase A en 4.16kV.....	89

Figura 6.9. Prueba del dispositivo detector en el lado de contactos hacia el equipo 206-P-0100AM, el cual estaba fuera de servicio y se verificó correctamente la ausencia de tensión de la fase C en 480 V.....	91
Figura 6.10. Prueba del dispositivo detector en el lado bus del tablero, el cual estaba energizado y se verificó correctamente la presencia de tensión de la fase C en 480 V.....	91
Figura 6.11. Secuencia de imágenes, donde se utiliza el rango de media tensión para disminuir la sensibilidad del dispositivo, comprobando oportunamente la presencia de voltaje en las fases A, B y C, y no detectando voltajes al medir entre las fases A y B, y B y C respectivamente.....	92
Figura A.1 Vista frontal, módulo detector y módulo receptor que conforman el prototipo detector.....	101
Figura A.2 Verificación de funcionamiento del modulo receptor.....	101
Figura A.3 Prototipo detector listo para detección de voltaje.....	102
Figura A.4 Vista lateral, selector rotatorio para definir el rango de operación en el modulo detector, BT para baja tensión, MT para media tensión y AT para alta tensión.....	102
Figura A.5 Vista lateral de módulo detector montado sobre una pértiga aislante de cabezal universal.....	103

Lista de tablas

	<i>Página</i>
Tabla 3.1. Recomendaciones internacionales de campo eléctrico.....	44
Tabla 4.1. Comparación de las características de un AO ideal vs un AO real.....	50
Tabla 5.1. Valores de Ganancia y Resistencia para el INA121.....	68
Tabla 5.2. Distancia de seguridad de acuerdo al nivel de tensión.....	69
Tabla 6.1. Pruebas realizadas para detección de alta tensión en SE Altamira III y IV a 400 kV.....	85
Tabla 6.2. Pruebas realizadas para la detección de media tensión a 13.8 kV.....	90
Tabla A.1 Distancias típicas de detección de acuerdo al rango de voltaje.....	100

Capítulo

1

Introducción

Este capítulo muestra una introducción del trabajo desarrollado, se presentan los antecedentes del proyecto, la definición del problema, la justificación del mismo, así como los objetivos, la hipótesis, los alcances y limitaciones.

1.1. ANTECEDENTES.

El sistema eléctrico nacional está conformado por diversos tipos de instalaciones, desde las centrales generadoras, las líneas de transmisión y las subestaciones de potencia, hasta las subestaciones, líneas y redes de distribución primaria y secundaria. Cada una de estas instalaciones dispone a su vez de diferentes equipos o dispositivos, cuyas funciones son muy amplias y específicas. Las líneas de transmisión y distribución conforman la red de transporte de energía eléctrica que es la parte del sistema de suministro eléctrico constituida por los elementos necesarios para llevar hasta los puntos de consumo y a través de grandes distancias los paquetes de energía generada en las centrales eléctricas.

Son muchas las ventajas que hacen hoy a la electricidad la forma de energía más utilizable en todo el mundo, motivo por el cual debe ser tratada con respeto. Para su uso eficiente y de bajo costo, deben considerarse ciertas precauciones, de lo contrario, todos los beneficios de este tipo de energía pasan a ser minimizados frente a la magnitud de los siniestros y a la destrucción que también pueden ocasionar.

Para el funcionamiento adecuado de las redes de energía eléctrica, es necesario realizar procedimientos, operaciones y/o cuidados en estas, tanto para la prevención como para la corrección de fallas que se puedan presentar.

Al llevar a cabo los servicios de mantenimiento preventivo o correctivo, han ocurrido accidentes mortales ó que han ocasionado lesiones graves al personal y daños considerables en las instalaciones; situaciones en las cuales, por ejemplo, no se han considerado las normas básicas de seguridad que se deben tener en cuenta para trabajos en línea viva, o incluso por fallas mecánicas en los controles de apertura y cierre donde no se desenergizaron las tres fases del sistema; o por diversas condiciones indeterminadas como exceso de confianza, falta de comunicación ó realización de maniobras sin la autorización respectiva.

Por estos motivos se requiere de un equipo de protección/prevención que sea capaz de detectar los niveles de tensión peligrosos al momento de trabajar en líneas de transmisión o distribución de alta, media y baja tensión, en las cuales por diferentes factores no se haya desenergizado correctamente la línea a trabajar, por lo que se pretende alertar/prevenir al personal involucrado y así evitar accidentes que puedan costar la vida, así como daños cuantiosos a los equipos que pudieran resultar afectados.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El hombre a través del tiempo ha buscado mejorar sus condiciones de vida, para ello ha desarrollado nuevas formas de energía, destacando entre ellas la electricidad. Esta forma de energía limpia, incolora e inodora pero que conlleva dentro de sí un gran peligro.

La seguridad en instalaciones eléctricas es una problemática frecuente dentro del sector eléctrico. Su importancia radica en el alto índice de accidentes que se producen por ignorarla. En México, de acuerdo con un estudio de la Federación de Colegios de Ingenieros Mecánicos, Electricistas, Electrónicos y de Ramas Afines de la República Mexicana A.C. (FECIME), basado en información del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), se presentaron 560 muertes por electrocución al año (2009).

La seguridad de una instalación eléctrica, desde su diseño hasta su implementación y mantenimiento, es fundamental para evitar accidentes. Al realizar el mantenimiento de una instalación eléctrica, los trabajadores del sector eléctrico encargados de llevar a cabo estas actividades, las realizan bajo condiciones que los exponen a diversos factores de riesgo (descargas, incendios o explosiones) que pueden desencadenar trastornos a la salud ó incluso la muerte, y a su vez lo que representa como repercusiones negativas para la empresa eléctrica, tanto por el ausentismo laboral, como por las indemnizaciones que pudieran aplicar, entre otras.

Por lo general, este tipo de incidentes se producen por diversos factores, entre los que destaca la antigüedad de las instalaciones, la ausencia de mantenimiento en las mismas, la falta de cumplimiento de normas y procedimientos, y los errores humanos. Por lo anterior, se hace necesario contar con equipos especialmente diseñados para la prevención de accidentes en el manejo y mantenimiento de las instalaciones eléctricas. Precisamente, el diseño y construcción de uno de estos equipos es, el propósito del presente proyecto, especialmente relacionado con accidentes debidos a errores humanos, o también a un mal funcionamiento en los dispositivos encargados de desconectar la parte del sistema eléctrico en donde se va a trabajar.

1.3. JUSTIFICACIÓN.

Son innumerables los accidentes eléctricos en donde se ha perdido la vida por no considerar las condiciones de seguridad al trabajar en las líneas de transmisión y distribución que conforman la red de transporte de energía eléctrica. Estos son algunos de ellos, tomados de la vida real:

1.3.1. Accidente 1. Quien iba a imaginarse...

El operador encargado de desenergizar la línea, maniobró la palanca de desconexión y la puso en posición "abierto". Luego indicó al jefe de grupo que la línea ya estaba sin tensión. Autorizado verbalmente por el operador, el jefe de grupo ordenó a su personal que procediera al cambio de crucetas. Los compañeros oyeron un grito agudo y algunos vieron como el liniero quedó colgado en la cruceta, sostenido por el cinturón de seguridad. Sus compañeros lograron bajarlo al suelo, aparentemente inconsciente; luego lo llevaron al hospital, donde constataron su fallecimiento.

Investigada la razón de por qué estuvo con tensión el conductor, a pesar de que la palanca de desconexión del interruptor en aceite la encontraron en posición "abierto", constataron que en el interior del interruptor sólo se había cortado la corriente en dos fases, no así en la tercera, que por falla mecánica permaneció conectada, dejando energizado el conductor que, precisamente, trató de desamarrar la víctima del accidente. [1]

1.3.2. Accidente 2. Aparentemente el operador se aisló de acuerdo a las normas de protección vigentes...

Un operador debía cambiar un fusible de alta tensión de un transformador trifásico de 13,8 KV., protegido con portafusibles y seccionadores unipolares en el lado de alta tensión, ubicados en una de las celdas de rejilla de una subestación. El operador tomó las precauciones reglamentarias: desconectó la alta tensión y abrió los seccionadores con una pértiga aislada.

Luego de asegurarse que los seccionadores unipolares estaban bien abiertos, abrió la puerta de protección y cambió el fusible. Después, cerró la puerta, se paró sobre el taburete y se dispuso a conectar los seccionadores unipolares. Cuando conectó el seccionador correspondiente al fusible repuesto, éste se fundió de nuevo y el Operador recibió una conmoción violenta, acompañada de pérdida de conocimiento y quemaduras graves en la pierna derecha y en el antebrazo, a la altura del codo. La investigación y análisis minucioso del accidente, permitieron descubrir la causa. Había estado con falla la porcelana del aislador de paso del transformador, justo la que correspondía a la fase del fusible fundido y repuesto, falla que hizo que se ponga a tierra el bobinado de alta tensión. [1]

1.3.3. Accidente 3. Un cliente casi mata a varios linieros...

Se iba a cambiar un poste de una línea trifásica de 23 KV. Se hicieron todas las maniobras para desconectar la línea. El jefe de grupo, al recibir el aviso de que la línea ya estaba sin tensión y que, por tanto, podía iniciar el trabajo, dispuso que uno de los linieros probara si la línea estaba efectivamente sin tensión. La prueba indicó que la línea seguía energizada.

Investigada la causa, se encontró que una fábrica, conectada a esa misma línea de 23 KV, al quedarse sin servicio, puso en funcionamiento un generador de emergencia de 220 voltios, maniobra que energizó la línea de 23 KV., a través del transformador de la fábrica, poniendo en peligro inminente la vida de los linieros. El dueño de la fábrica había hecho instalar el generador de emergencia sin consentimiento ni autorización de la Empresa Eléctrica. Además, no había hecho instalar un interruptor que, en estos casos, es indispensable hacerlo para evitar precisamente lo sucedido. [1]

Estos accidentes se pudieron evitar identificando las situaciones de peligro y adoptando oportunamente las acciones correctivas. Como se puede observar, en el último caso se menciona un incidente, en el cual, si las condiciones de trabajo hubieran sido ligeramente diferentes se hubiera ocasionado una posible tragedia.

La seguridad es siempre una responsabilidad compartida entre el trabajador y su empleador. El trabajador está obligado a respetar las normas, procedimientos y al uso de todos los implementos de seguridad que el empleador le entrega. Por su parte el empleador está obligado a asignar sólo personal calificado, entregar las capacitaciones y charlas de seguridad respectivas, así como de proveer todo el equipo de protección personal requerido para la labor en particular.

Al trabajar con equipo desenergizado, se debe recordar las cinco reglas de oro de la prevención de accidentes eléctricos, que se pueden resumir en:

- Abrir todas las fuentes de tensión.
- Bloquear los aparatos de corte.
- Verificar la ausencia de tensión.
- Instalar los equipos de puesta a tierra.
- Limitar y señalizar la zona de trabajo.

Como se puede observar, el verificar la ausencia de tensión en el área a trabajar es uno de los requisitos imprescindibles, por lo que se hace la necesidad de un equipo el cual detecte los niveles de tensión peligrosos para conseguir que la prevención de accidentes sea aún más eficaz y segura.

1.4. OBJETIVOS.

1.4.1. Objetivo general.

Desarrollar e implementar un prototipo detector de presencia/ausencia de voltaje para baja, media y alta tensión a un bajo costo, el cual perciba a distancia la existencia de un voltaje de corriente alterna en un conductor o equipo eléctrico para diferentes rangos de operación, y avise al usuario mediante la emisión de un sonido y un indicador luminoso.

1.4.2. Objetivo específico.

- ✓ Las características eléctricas para rango de operación de acuerdo al nivel de voltaje serán:
 - Baja tensión < 600V
 - 600V < Media tensión < 40kV
 - Alta tensión > 40kV

- ✓ La frecuencia de operación podrá ser:
 - 50 – 60 Hz

- ✓ La temperatura de operación adecuada:
 - 15° a 55° C

- ✓ La alimentación del detector de voltaje será proporcionada por baterías alcalinas.

1.5. HIPÓTESIS.

1.- Es posible detectar el campo eléctrico emitido por un conductor o equipo energizado con determinado potencial eléctrico, a cierta distancia del mismo, sin hacer contacto físico con dicho conductor o equipo.

2.- Es posible seleccionar el nivel de voltaje a detectar del elemento energizado para diferentes niveles de operación que el usuario requiera, desde unos pocos cientos de volts hasta centenas de kV.

1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES.

1.6.1. Alcances.

El prototipo detector de presencia/ausencia de voltaje para baja, media y alta tensión que se desarrolló, es para aplicación en líneas de transmisión y distribución del sistema eléctrico nacional, aunque también podrá ser aplicado a cualquier tipo de equipo eléctrico energizado donde se requiera realizar una detección de niveles peligrosos de tensión.

El prototipo desarrollado está enfocado a realizar pruebas reales sobre equipo eléctrico energizado y sobre la red de suministro eléctrico, el cual está diseñado para operar a los diferentes niveles de voltaje manejados a nivel nacional.

1.6.2. Limitaciones.

Principalmente, los factores de riesgo que conlleva trabajar con baja, media y alta tensión al hacer la pruebas sobre dicho prototipo.

Se tiene también como una limitación que no se puede detectar líneas subterráneas energizadas o cables de potencia blindados, debido a que el principio de operación es detectar el campo eléctrico, el cual se apantalla al contacto con cualquier objeto conductor. Las líneas del campo eléctrico van desde la distribución de carga que genera el campo hasta otras cargas donde terminan las líneas de fuerza.

De lo que se puede deducir que si se sitúa cualquier objeto que pueda conducir la electricidad, como una hilera de árboles, una pared o el mismo blindaje de los cables mencionados, la mayor parte de las líneas del campo eléctrico “morirán” en las cargas de la superficie de estos objetos.

Capítulo

2

Marco teórico

Este capítulo muestra una introducción a la teoría de campo eléctrico, incluyendo los temas específicos para su análisis y comprensión como, su definición formal y su definición matemática, la definición mediante la ley de Coulomb, su descripción mediante las leyes de Gauss y Faraday, el comportamiento de las líneas de campo, la energía del mismo, así como el análisis del campo electromagnético y sus inducciones electromagnéticas.

2.1. SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL.

Al contrario de lo que sucede con otras fuentes de energía (gas, petróleo, carbón...), la energía eléctrica no se puede almacenar en grandes cantidades. Toda la electricidad que se necesita en cada momento en hogares, escuelas, hospitales, industrias, etc. tiene que producirse de forma simultánea en centros de generación; para ello se necesita un equilibrio complicado y permanente entre generación y consumo, y una red de transporte que distribuya esa electricidad. [2]

Para contar con la energía eléctrica necesaria para el crecimiento y desarrollo del país, la Comisión Federal de Electricidad cuenta con centrales generadoras, líneas y subestaciones que producen, transmiten, transforman y distribuyen la energía eléctrica a lo largo del país.

Después de que la electricidad es creada en las plantas generadoras el siguiente paso es transmitirla y así pueda llegar a todos los centros de consumo. Para lo anterior se necesita la red eléctrica de transmisión y distribución de alta, media y baja tensión a lo largo y ancho de todo el país. Esta red está formada por torres, líneas de transmisión y subestaciones, apoyados por equipos de protección, comunicaciones y control, que desde el Centro Nacional de Control de Energía se optimiza la infraestructura física, equilibrando la demanda que requieren los consumidores finales en condiciones de cantidad, calidad y precio.[3]

Una línea de transporte de energía eléctrica o línea de baja, media o alta tensión es básicamente el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión de la energía eléctrica a grandes distancias. Está constituida tanto por el elemento conductor, usualmente cables de acero, cobre o aluminio, como por sus elementos de soporte, las torres de alta tensión que sostienen las líneas de transporte, por medio de unos aisladores de porcelana o silicón que evitan que la electricidad circule por las mismas. Generalmente se dice que los conductores "tienen vida propia" debido a que están sujetos a tracciones causadas por la combinación de agentes como el viento, la temperatura del conductor, la temperatura del viento, etc. En las subestaciones de transformación, es donde la electricidad se aumenta o se reduce en tensión,

dependiendo de la necesidad. Si aumenta se define como alta tensión, la cual pueden viajar largas distancias con el mínimo de pérdidas. A la inversa, si se reduce se define como baja tensión y se utiliza para entregar a los centros de consumo. [4]

Al igual que cualquier otro equipo o aparato que funcione con energía eléctrica, las líneas eléctricas de alta tensión generan un campo eléctrico y magnético. Su intensidad dependerá de diversos factores, como el voltaje, potencia eléctrica que transporta, geometría del apoyo, número de conductores, distancia de los cables al suelo, etc. [2]

2.2. INSTRUMENTACIÓN DE MEDICIONES ELÉCTRICAS.

La importancia de los instrumentos eléctricos de medida, presentes a lo largo de la historia, es innegable y monumental, pues miden e indican magnitudes eléctricas, como corriente, carga, potencial y energía, así como las características eléctricas de los circuitos, las cuales son su resistencia, capacitancia o inductancia. Los instrumentos localizan las causas de operaciones indebidas de los aparatos eléctricos, donde es imposible apreciar su funcionamiento de forma visual. La información que suministran los instrumentos de medida eléctrica se suele expresar en unidades eléctricas estándar (ohmios, voltios, amperios, culombios, henrios, faradios, vatios, julios, teslas etc.), empleadas para medir cuantitativamente fenómenos electrostáticos y electromagnéticos, y se definen en el Sistema Internacional de unidades, aunque en ocasiones se sigan utilizando unidades más antiguas.

La energía eléctrica, por su propia naturaleza, es imposible medir con nuestros sentidos sus valores eléctricos. Por ello se utilizan ciertas propiedades de la electricidad para producir una fuerza física susceptible de ser detectada y medida en un instrumento. La acción electromagnética entre corrientes, la fuerza entre cargas eléctricas y el calentamiento motivado por una resistencia conductora son algunos de los métodos utilizados para obtener medidas eléctricas. Para garantizar la uniformidad y la precisión de las medidas, los medidores eléctricos se calibran conforme a patrones de medida aceptados para una determinada unidad

eléctrica, patrones que se basan en las definiciones de tales unidades, aceptadas en el ámbito internacional, y basadas en la masa, el tamaño del conductor y el tiempo.

2.3. CAMPO ELÉCTRICO.

El campo eléctrico es un campo físico que es representado mediante un modelo que describe la interacción entre cuerpos y sistemas con propiedades de naturaleza eléctrica. Se describe como un campo vectorial en el cual una carga eléctrica puntual de valor Q sufre los efectos de una fuerza eléctrica \vec{F} dada por la siguiente ecuación:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (2.1)$$

En los modelos relativistas actuales, el campo eléctrico se incorpora, junto con el campo magnético, en campo tensorial cuadridimensional, denominado campo electromagnético $F^{\mu\nu}$.

Los campos eléctricos pueden tener su origen tanto en cargas eléctricas como en campos magnéticos variables. Las primeras descripciones de los fenómenos eléctricos, como la ley de Coulomb, sólo tenían en cuenta las cargas eléctricas, pero las investigaciones de Michael Faraday y los estudios posteriores de James Clerk Maxwell permitieron establecer las leyes completas en las que también se tiene en cuenta la variación del campo magnético.

Esta definición general indica que el campo no es directamente medible, sino, que lo que es observable es su efecto sobre alguna carga colocada en su periferia. La idea de campo eléctrico fue propuesta por Faraday al demostrar el principio de inducción electromagnética en el año 1832.

La unidad del campo eléctrico en el sistema internacional (SI) es Newton por Culombio (N/C), Voltio por metro (V/m) o, en unidades básicas, $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$ y la ecuación dimensional es $\text{MLT}^{-3}\text{I}^{-1}$. [5]

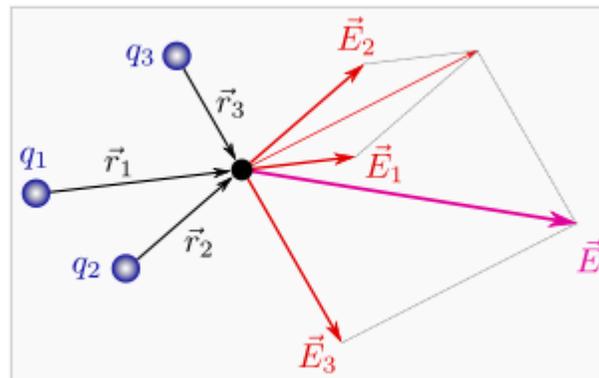


Figura 2.1. Campo eléctrico producido por un conjunto de cargas puntuales. Se muestra en rosa la suma vectorial de los campos de las cargas individuales. $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$.

2.4. DEFINICIÓN DE CAMPO ELÉCTRICO.

La presencia de carga eléctrica en una región del espacio modifica las características de dicho espacio, dando lugar a un campo eléctrico. Así pues, podemos considerar un campo eléctrico como una región del espacio cuyas propiedades han sido modificadas por la presencia de una carga eléctrica, de tal modo que al introducir en dicho campo eléctrico una nueva carga eléctrica, ésta experimentará una fuerza.

El campo eléctrico se representa matemáticamente mediante el *vector campo eléctrico*, definido como el cociente entre la fuerza eléctrica que experimenta una carga testigo y el valor de esa carga testigo (una carga testigo positiva).

La definición más intuitiva del campo eléctrico se la puede dar mediante la ley de Coulomb. Esta ley, una vez generalizada, permite expresar el campo entre distribuciones de carga en reposo relativo. Sin embargo, para cargas en movimiento se requiere una definición más formal y completa, se requiere el uso de cuadvectores y el principio de mínima acción. A continuación se describen ambas. Debe tenerse presente de todas maneras que desde el punto de vista relativista, la definición de campo eléctrico es relativa y no absoluta, ya que observadores en movimiento relativo entre sí medirán campos eléctricos o "partes eléctricas"

del campo electromagnético diferentes, por lo que el campo eléctrico medido dependerá del sistema de referencia escogido. [5]

2.5. DEFINICIÓN MEDIANTE LA LEY DE COULOMB.

Partiendo de la ley de Coulomb que expresa que:

La magnitud de cada una de las fuerzas eléctricas con que interactúan dos cargas puntuales en reposo es directamente proporcional al producto de la magnitud de ambas 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 constante de proporcionalidad depende de la constante dieléctrica del medio en el que se encuentran las cargas. Matemáticamente es igual a:

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{r}_{12} \quad (2.2)$$

Donde:

ϵ_0 , es la permisividad eléctrica del vacío, constante definida en el sistema internacional,

q_1, q_2 , son las cargas que interactúan,

$r = ||r_{12}||$, es la distancia entre ambas cargas,

r_{12} , es el vector de posición relativa de la carga 2 respecto a la carga 1.

\hat{r} , es el unitario en la dirección \vec{r} .

Nótese que en la fórmula se está usando ϵ_0 , esta es la permisividad en el vacío. Para calcular la interacción en otro medio es necesario cambiar la permisividad de dicho medio. ($\epsilon = \epsilon_e * \epsilon_0$)

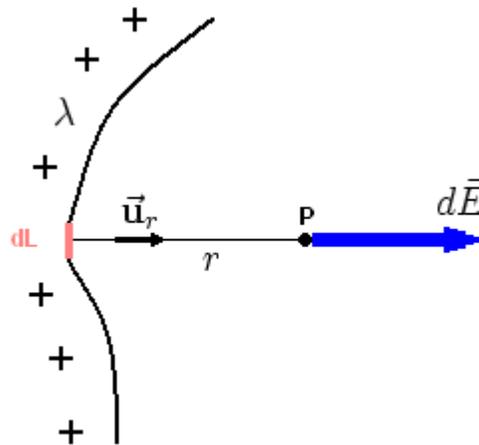


Figura 2.2. Campo eléctrico de una distribución lineal de carga. Una carga puntual P es sometida a una fuerza en dirección radial \vec{u}_r por una distribución de carga λ en forma diferencial de línea (dL), lo que produce un campo eléctrico $d\vec{E}$.

La ley anterior suponía que la posición de una partícula en un instante dado, hace que su campo eléctrico afecte en el mismo instante a cualquier otra carga. Ese tipo de interacciones en las que el efecto sobre el resto de partículas parece depender sólo de la posición de la partícula causante sin importar la distancia entre las partículas se denomina en física acción a distancia. Si bien la noción de acción a distancia fue aceptada inicialmente por el propio Newton, experimentos más cuidados a lo largo del siglo XIX llevaron a desechar dicha noción como no-realista. En ese contexto se pensó que el campo eléctrico no sólo era un artificio matemático sino un ente físico que se propaga a una velocidad finita (la velocidad de la luz) hasta afectar a otras partículas. Esa idea conllevaba modificar la ley de Coulomb de acuerdo con los requerimientos de la teoría de la relatividad y dotar de entidad física al campo eléctrico. Así, el campo eléctrico es una distorsión electromagnética que sufre el espacio debido a la presencia de una carga. Considerando esto se puede obtener una expresión del campo eléctrico cuando este sólo depende de la distancia entre las cargas:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (2.3)$$

Donde claramente se tiene que $F=qE$, que es una de las definiciones más conocidas acerca del campo eléctrico. [5]

2.6. DEFINICIÓN FORMAL.

La definición más formal de campo eléctrico, válida también para cargas moviéndose a velocidades cercanas a la de la luz, surge a partir de calcular la acción de una partícula cargada en movimiento a través de un campo electromagnético. Este campo forma parte de un único campo electromagnético tensorial $F^{\mu\nu}$ definido por un potencial cuadvectorial de la forma:

$$F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu ; \quad A^i = \left(\frac{\emptyset}{c}, \mathbf{A} \right) \quad (2.4)$$

Donde \emptyset es el potencial escalar y \mathbf{A} es el potencial vectorial tridimensional. Así, de acuerdo al principio de mínima acción, se plantea para una partícula en movimiento en un espacio cuatridimensional:

$$S = - \int_b^b \left(mc ds + \frac{e}{c} A^i dx^i \right) \quad (2.5)$$

Donde e es la carga de la partícula, m es su masa y c la velocidad de la luz. Reemplazando (2.4) en (2.5) y conociendo que $dx^i = u^i ds$, donde dx^i es el diferencial de la posición definida $dx^i = (cdt, dx, dy, dz)$ y u^i es la velocidad de la partícula, se obtiene:

$$S = - \int_b^b \left(mc ds + \frac{e}{c} \mathbf{A} * d\mathbf{r} - e\emptyset dt \right) \quad (2.6)$$

El término dentro de la integral se conoce como el lagrangiano del sistema; derivando esta expresión con respecto a la velocidad, se obtiene el momento de la partícula, y aplicando

las ecuaciones de Euler-Lagrange se encuentra que la variación temporal de la cantidad de movimiento de la partícula es:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{e}{c} \frac{\partial A}{\partial t} - e \nabla \phi + \frac{e}{c} \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) \quad (2.7)$$

De donde se obtiene la fuerza total de la partícula. Los dos primeros términos son independientes de la velocidad de la partícula, mientras que el último depende de ella. Entonces a los dos primeros se les asocia el campo eléctrico y al tercero el campo magnético. Así se encuentra la definición más general para el campo eléctrico:

$$\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (2.8)$$

La ecuación (2.8) brinda mucha información acerca del campo eléctrico. Por un lado, el primer término indica que un campo eléctrico es producido por la variación temporal de un potencial vectorial descrito como $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ donde \mathbf{B} es el campo magnético; y por otro lado, el segundo representa la muy conocida descripción del campo como el gradiente de un potencial. [5]

2.7. DESCRIPCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO.

Matemáticamente un campo se lo describe mediante dos de sus propiedades, su divergencia y su rotacional. La ecuación que describe la divergencia del campo eléctrico se la conoce como ley de Gauss y la de su rotacional es la ley de Faraday.

2.7.1. Ley de Gauss

Para conocer una de las propiedades del campo eléctrico se estudia que ocurre con el flujo de éste al atravesar una superficie. El flujo de un campo Φ se obtiene de la siguiente manera:

$$\Phi_E = \oint_s \vec{E} \cdot d\vec{a} \quad (2.9)$$

Donde $d\vec{a}$ es el diferencial de área en dirección normal a la superficie. Analizando el flujo a través de una superficie cerrada se encuentra que:

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{1}{\epsilon_0} Q_{\text{enc}} \quad (2.10)$$

Donde Q_{enc} es la carga encerrada en esa superficie. La ecuación (2.10) es conocida como la ley integral de Gauss y su forma derivada es:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.11)$$

Donde ρ es la densidad volumétrica de carga. Esto indica que el campo eléctrico diverge hacia una distribución de carga; en otras palabras, que el campo eléctrico comienza en una carga y termina en otra.

Esta idea puede ser visualizada mediante el concepto de líneas de campo. Si se tiene una carga en un punto, el campo eléctrico estaría dirigido hacia la otra carga.

2.7.2. Ley de Faraday

En 1801, Michael Faraday realizó una serie de experimentos que lo llevaron a determinar que los cambios temporales en el campo magnético inducen un campo eléctrico. Esto se conoce como la ley de Faraday. La fuerza electromotriz, definida como el rotacional a través de un diferencial de línea está determinado por:

$$\epsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.12)$$

Donde el signo menos indica la Ley de Lenz y Φ es el flujo magnético en una superficie, determinada por:

$$\Phi = \int \vec{B} d\vec{a} \quad (2.13)$$

Reemplazando (2.13) en (2.12) se obtiene la ecuación integral de la ley de Faraday:

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = - \int \frac{d\vec{B}}{dt} d\vec{a} \quad (2.14)$$

Aplicando el teorema de Stokes se encuentra la forma diferencial:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.15)$$

La ecuación (2.15) completa la descripción del campo eléctrico, indicando que la variación temporal del campo magnético induce un campo eléctrico. [5]

2.8. LÍNEAS DE CAMPO.

Un campo eléctrico estático puede ser representado geoméricamente con líneas tales que en cada punto el campo vectorial sea tangente a dichas líneas, a estas líneas se las conoce como "líneas de campo". Matemáticamente las líneas de campo son las curvas integrales del campo vectorial. Las líneas de campo se utilizan para crear una representación gráfica del campo, y pueden ser tantas como sea necesario visualizar.

Las líneas de campo son líneas perpendiculares a la superficie del cuerpo, de manera que su tangente geométrica en un punto coincide con la dirección del campo en ese punto. Esto es una consecuencia directa de la ley de Gauss, es decir encontramos que la mayor

variación direccional en el campo se dirige perpendicularmente a la carga. Al unir los puntos en los que el campo eléctrico es de igual magnitud, se obtiene lo que se conoce como superficies equipotenciales, aquellas donde el potencial tiene el mismo valor numérico. En el caso estático al ser el campo eléctrico un campo irrotacional las líneas de campo nunca serán cerradas (cosa que sí puede suceder en el caso dinámico, donde el rotacional del campo eléctrico es igual a la variación temporal del campo magnético cambiada de signo, por tanto una línea de campo eléctrico cerrado requiere un campo magnético variable, cosa imposible en el caso estático). En el caso dinámico pueden definirse igualmente las líneas sólo que el patrón de líneas variará de un instante a otro del tiempo, es decir, las líneas de campo al igual que las cargas serán móviles. [6]

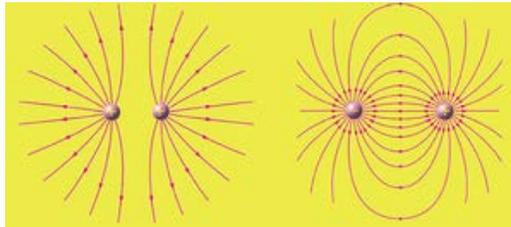


Figura 2.3. Líneas de campo eléctrico correspondientes a cargas iguales y opuestas, respectivamente.

2.9. ENERGÍA DEL CAMPO ELÉCTRICO.

Un campo en general almacena energía y en el caso de cargas aceleradas puede transmitir también energía (principio aprovechado en antenas de telecomunicaciones). La densidad volumétrica de energía de un campo eléctrico está dada por la expresión siguiente:

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (2.16)$$

Por lo que la energía total en un volumen V está dada por:

$$U = \frac{\epsilon_0}{2} \int_V E^2 dV \quad (2.17)$$

Donde dV es el diferencial de volumen. [6]

2.10. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO.

Un campo electromagnético es un campo físico, de tipo tensorial, producido por aquellos elementos cargados eléctricamente, que afecta a partículas con carga eléctrica.

Convencionalmente, dado un sistema de referencia, el campo electromagnético se divide en una "parte eléctrica" y en una "parte magnética". Sin embargo, esta distinción no puede ser universal sino dependiente del observador. Así un observador en movimiento relativo respecto al sistema de referencia medirá efectos eléctricos y magnéticos diferentes, que un observador en reposo respecto a dicho sistema. Esto ilustra la relatividad de lo que se denomina "parte eléctrica" y "parte magnética" del campo electromagnético. Como consecuencia de lo anterior tenemos que ni el "vector" campo eléctrico ni el "vector" de inducción magnética se comportan genuinamente como magnitudes físicas de tipo vectorial, sino que juntos constituyen un tensor para el que sí existen leyes de transformación físicamente esperables. [6]

2.11. INDUCCION ELECTROMAGNÉTICA.

La inducción electromagnética es el fenómeno que origina la producción de una fuerza electromotriz (f.e.m. o voltaje) en un medio o cuerpo expuesto a un campo magnético variable, o bien en un medio móvil respecto a un campo magnético estático. Es así que, cuando dicho cuerpo es un conductor, se produce una corriente inducida. Este fenómeno fue descubierto

por Michael Faraday quien lo expresó indicando que la magnitud del voltaje inducido es proporcional a la variación del flujo magnético (*Ley de Faraday*).

Por otra parte, Heinrich Lenz comprobó que la corriente debida a la f.e.m. inducida se opone al cambio de flujo magnético, de forma tal que la corriente tiende a mantener el flujo. Esto es válido tanto para el caso en que la intensidad del flujo varíe, o que el cuerpo conductor se mueva respecto de él.

2.11.1. Definición matemática.

La ley de inducción de Faraday establece que la Fuerza Electromotriz inducida en un circuito es igual a menos la derivada del flujo magnético con respecto del tiempo. [6]

Matemáticamente se puede expresar como:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.18)$$

Donde:

Φ = Flujo magnético en weber

t = Tiempo en segundos

Y el signo (-) es debido a la Ley de Lenz.

2.12. ANTENAS.

Una antena es un dispositivo (conductor metálico) diseñado con el objetivo de emitir o recibir ondas electromagnéticas hacia el espacio libre. Una antena transmisora transforma voltajes en ondas electromagnéticas, y una receptora realiza la función inversa. Existe una gran diversidad de tipos de antenas. En unos casos deben expandir en lo posible la potencia radiada, es decir, no deben ser directivas (ejemplo: una emisora de radio comercial o una

estación base de teléfonos móviles), otras veces deben serlo para canalizar la potencia en una dirección y no interferir a otros servicios (antenas entre estaciones de radioenlaces).

Las características de las antenas dependen de la relación entre sus dimensiones y la longitud de onda de la señal de radiofrecuencia transmitida o recibida. Si las dimensiones de la antena son mucho más pequeñas que la longitud de onda las antenas se denominan elementales, si tienen dimensiones del orden de media longitud de onda se llaman resonantes, y si su tamaño es mucho mayor que la longitud de onda son directivas.

Se le llama campo electromagnético a la región del espacio por donde se propagan las ondas electromagnéticas, es decir, al conjunto de los campos eléctrico y electromagnético. Este tipo de campo tiene, por lo tanto, propiedades eléctricas y magnéticas. El origen de las ondas electromagnéticas es el movimiento de electrones a través de un metal conductor. Dichas ondas se propagan a través del espacio a la velocidad de la luz (300000 km/s). Este es el principio de funcionamiento de una antena. [7]

Interacción de los campos eléctricos

En este capítulo se presentan los temas relacionados con la interacción de los campos eléctricos, considerando el comportamiento eléctrico de los materiales en presencia de los mismos, sus características espaciales y estabilidad temporal, su contenido de armónicos y transitorios, los efectos producidos por los campos eléctricos de las líneas de energía eléctrica como lo son las corrientes inducidas y la percepción del campo por las personas, así como también el perfil del campo eléctrico bajo líneas de transporte de energía eléctrica, el campo debido a un conductor considerando el efecto tierra, el campo debido a varios conductores considerando el efecto tierra, el campo a nivel del suelo, el campo en función del tiempo y las recomendaciones internacionales de campo eléctrico máximo.

3.1. COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DE MATERIALES EN PRESENCIA DE CAMPO ELÉCTRICO.

Un conductor es un material generalmente metálico, como por ejemplo, el cobre, que posee una cierta cantidad de electrones que pueden moverse libremente dentro del material, ya que no están ligados a sus átomos. Esto hace que en presencia de un campo eléctrico en el conductor, estos electrones se muevan originando una corriente eléctrica. Suponiendo que un material se encuentra dentro de un campo eléctrico \vec{E} , este campo ejerce una fuerza de valor qE sobre cada carga “ q ” que se encuentre libre en él, lo que hace que se acelere y se mueva en el interior del material en la dirección de \vec{E} . Como el sentido del campo eléctrico está dirigido desde los puntos de mayor potencial a los de menor potencial, éste será también el sentido del movimiento de las cargas libres positivas. La física clásica considera que la materia está constituida por átomos en los que se puede distinguir entre el núcleo, que tiene fundamentalmente la masa del átomo y que está cargado positivamente, y los electrones, con carga eléctrica negativa y que se encuentran situados alrededor del núcleo en movimiento en ciertas capas o zonas posibles denominadas bandas de energía, en conjunto, el átomo es estable y eléctricamente neutro, y los electrones de la última capa del átomo, se denominan electrones de valencia; y según la fuerza con la que estos electrones están ligados al núcleo, se podrán o no desplazar de un átomo al contiguo con mayor o menor facilidad.

<< Si algo radia como una antena y recibe señal como una antena, aunque no parezca una antena... seguro que es una antena >>.

Un campo, es entendido como la interacción entre cuerpos en ausencia de contacto físico y sin medios de sustentación para ello. Los fenómenos de un campo eléctrico son distintos si el medio en que manifiesta es aislante o conductor. En el primer caso las cargas están sujetas a su núcleo atómico y no pueden moverse libremente a pesar de las fuerzas que aparecen sobre ellas, en este caso el campo es electrostático. Si el campo eléctrico se manifiesta en un medio conductor, los electrones libres se mueven bajo su efecto, esta acción propicia que aparezca la corriente eléctrica.

El acoplo por campo eléctrico, predominante en circuitos de alta impedancia, es característico por su naturaleza capacitiva; al existir una diferencia de tensión entre dos puntos, se crea un campo eléctrico, este campo induce voltaje en cualquier línea o circuito adyacente ha dicho campo. El voltaje inducido esta descrito por la siguiente ecuación:

$$V_{in} = C_m Z_{in} \frac{dV_s}{dt} \quad (3.1)$$

Donde:

V_{in} = Tensión inducida.

C_m = Capacidad mutua entre dos puntos.

Z_{in} = Impedancia del receptor.

V_s = Voltaje de interferencia (fuente).

dt = Tiempo.

El acoplo por campo eléctrico introduce un voltaje en el circuito adyacente y la impedancia de la carga de este circuito afecta de modo notable en este voltaje. Los circuitos con alta impedancia son más sensibles a acoplos por campo eléctrico. Los efectos de los acoplos por campos eléctricos son pequeños comparados con otros mecanismos de acoplo y el flujo eléctrico acoplado entre dos circuitos está representado por un condensador. La capacidad mutua entre dos circuitos dependerá del nivel de voltaje presente en los circuitos, no de la corriente. La capacidad está afectada por la distancia entre circuitos, especialmente en líneas de transporte de energía eléctrica. [8]

3.2. CARACTERÍSTICAS ESPACIALES Y ESTABILIDAD TEMPORAL.

El campo eléctrico tiene una magnitud y una dirección en un determinado punto en el espacio y en un momento dado, es decir, el valor instantáneo del campo. Este valor instantáneo, e , puede ser expresada por un vector en el espacio, el cual puede ser descrito por sus componentes a lo largo de tres ejes de un sistema de coordenadas ortogonales. Estos componentes son e_x , e_y y e_z .

$$\bar{e} = e_x \bar{u}_x + e_y \bar{u}_y + e_z \bar{u}_z \quad (3.2)$$

Y su magnitud:

$$e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2 + e_z^2} \quad (3.3)$$

El campo eléctrico es perpendicular a la superficie de los cuerpos conductores. En particular, es perpendicular a la superficie de la tierra. Cuando el terreno es plano y sin objetos que lo perturbe, el campo eléctrico causado por una fuente lejana (equipos de alta tensión, cables de alta tensión) es vertical y relativamente uniforme. Sin embargo, el campo eléctrico es más bien no uniforme, especialmente cerca de objetos conductores como el cuerpo humano. El campo eléctrico se ve perturbado por la presencia del cuerpo humano y demás objetos conductores. El campo es un vector, que tiene dirección en el espacio, y además es un fasor, porque tiene una variación periódica en el tiempo, esto porque los sistemas de energía que los generan varían periódicamente con la frecuencia, entonces el campo eléctrico cambia de magnitud o de dirección, o ambas, cada 1/60 segundos (0.0167 s) en sistemas de 60 Hz, y cada 1/50 segundos (0.02 s) en sistemas de 50 Hz. Las magnitudes de campo eléctrico prácticamente no tienen variaciones en el tiempo. Esto refleja el hecho de que las tensiones son por lo general constantes, incluso cuando las cargas eléctricas son variables. La exposición del campo eléctrico, sin embargo, varía en el tiempo, porque una persona se mueve en los campos no uniformes. [9]

3.3. EL CONTENIDO DE ARMÓNICOS Y TRANSITORIOS.

Para sistemas de corriente alterna, los campos eléctricos son funciones periódicas de tiempo, y cada uno se puede expresar como la suma de los campos eléctricos sinusoidales y sus armónicos. Un campo armónico tiene variaciones sinusoidales con una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental.

Los voltajes de alimentación de los sistemas de energía eléctrica y los campos eléctricos tienen poco contenido de armónicos. Los campos eléctricos cerca de las líneas de transporte de energía eléctrica generalmente tienen una distorsión armónica total inferior al

1%, la mayor armónica es generalmente la quinta armónica, así por ejemplo, en sistemas con frecuencia de 60 Hz, la quinta armónica correspondería a la frecuencia de 300 Hz.

Por su parte, los transitorios de tensión en las líneas aéreas causan oscilaciones del campo eléctrico que se caracterizan por una gran tasa de cambio del campo eléctrico, dE/dt . Los transitorios de campo eléctrico con mayor tasa de cambio son los ocasionados por los rayos. En la práctica se realizan simulaciones de campo eléctrico transitorio para estudiar las distribuciones del campo en objetos sometidos a impulsos, por ejemplo sobretensiones inducidas por los rayos. También se puede aplicar para diseñar construcciones de aislamiento modernas, que incluye elementos no lineales de ecualización de campo y protección contra sobretensiones de varistores. [9]

3.4. EFECTOS PRODUCIDOS POR EL CAMPO ELÉCTRICO DE LÍNEAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA. [10]

Los conductores de una línea de transporte de energía eléctrica de cierto nivel de tensión producen en sus alrededores un campo eléctrico, cuya intensidad se expresa en V/m. La intensidad del campo eléctrico depende fundamentalmente de la tensión de operación de la línea y de la distancia del punto de medición a los conductores, siendo sus variaciones en relación directa e inversa, respectivamente.

3.4.1. Corrientes inducidas

Cuando un objeto conductor se encuentra en un campo eléctrico de una línea de energía de corriente alterna, se pueden inducir en él tensiones y corrientes cuya magnitud depende de la intensidad y de las frecuencias del campo, del tamaño y forma del objeto y de sus condiciones de conexión a tierra.

En el caso de una persona que esté de pie en el suelo o que toque un objeto metálico conectado a tierra, en un campo eléctrico de una línea de energía eléctrica, la magnitud de esa

corriente de descarga es varias veces inferior al nivel de percepción de ese tipo de corriente por un ser humano (1 mA). Si esa persona, por el contrario, toca un objeto aislado de tierra, como es el caso típico de un vehículo con ruedas aislantes, la corriente inducida en ese objeto se descargará a través de la persona. Según el tamaño y forma del objeto, dicha corriente puede alcanzar valores importantes que provoquen sensaciones de molestias o incluso dificultad del control de los músculos por donde circule. De aquí que es práctica usual limitar el valor de dicha corriente a un nivel denominado corriente para soltarse que se ha establecido en 5 mA, además se deben tomar precauciones especiales respecto a la conexión a tierra de tales objetos.

3.4.2. Percepción del campo eléctrico por las personas

Desde la aparición de las líneas de transporte de energía eléctrica, el estudio de este tema ha recibido gran atención de parte de las autoridades del ramo, entidades científicas y empresas eléctricas. Los estudios pertinentes se han hecho principalmente en laboratorios dado que la intensidad del campo eléctrico producido por las líneas no alcanza valores a los que manifiesta efectos que podrían percibir las personas.

Además de aquellos aspectos que se relacionan con la percepción de la corriente de descarga, los estudios se han concentrado en el conocimiento de la percepción del campo eléctrico propiamente tal. Estos estudios se han hecho principalmente en animales sometidos durante periodos prolongados (meses) a valores superiores a 20 kV/m, y en personas, pero en periodos cortos (hasta 2 días), sometidos a valores hasta 20 kV/m. en dichos estudios se ha detectado que el umbral de percepción del campo eléctrico por las personas es de aproximadamente 10 kV/m, y que, en circunstancias especiales, algunos individuos pueden detectar campos de 3 kV/m. En cuanto a las personas sometidas hasta 20 kV/m, se manifiestan en ellas, en forma débil, algunos efectos en sus parámetros vitales, los que son reversibles y están dentro de la dispersión natural de ellos. Por lo que se puede señalar que los campos eléctricos producidos por las líneas de energía eléctrica no constituyen un peligro para las

personas, debido a que no se ha detectado impactos nocivos ni secuelas dañinas sobre las mismas.

3.5. CAMPO ELÉCTRICO BAJO LÍNEAS DE TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA. [11]

Para obtener la intensidad del campo eléctrico bajo las líneas de transmisión es necesario referirse a la ley de Gauss. Esta ley es la que relaciona el flujo eléctrico a través de una superficie abierta o cerrada y la carga eléctrica encerrada en esta superficie. En este tema lo que interesa en un campo eléctrico es el flujo que se mide por el número de líneas de fuerza que atraviesan una superficie.

Para definir el flujo eléctrico se considera una superficie cerrada arbitraria dentro de un campo eléctrico, esta se divide en cuadrados elementales ΔS cada uno de los cuales es lo suficientemente pequeño como para considerarse plano, estos elementos pueden ser representados como vectores $\overline{\Delta S}$ cuya magnitud es la propia área, la dirección es normal a la superficie y el sentido hacia fuera, en cada cuadrado también es posible trazar un vector de campo eléctrico \vec{E} ya que los cuadrados son tan pequeños como se quiera \vec{E} puede considerarse constante en todos los puntos de un cuadrado, figura 3.1.

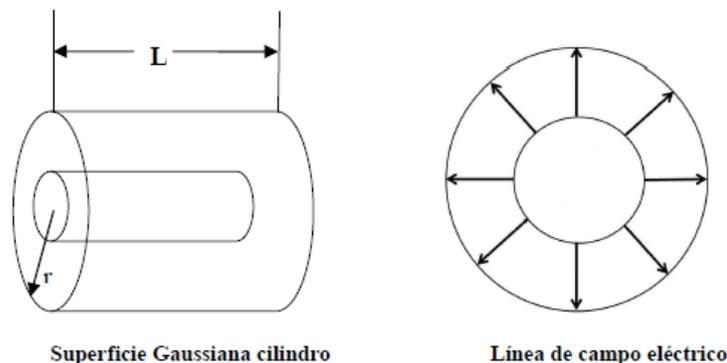


Figura 3.1. Campo en un punto debido a una línea aislada.

Por Gauss, la magnitud del campo eléctrico creado por la carga (que está dada por unidad de longitud), de una línea de transporte de energía eléctrica a una distancia r del centro del conductor es:

$$E = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon_0}\right) (q) \left(\frac{1}{r}\right) \text{ En } \left[\frac{V}{m}\right] \quad (3.4)$$

$$E = k \frac{q}{r} \quad (3.5)$$

$$\text{Con } k = 18 \times 10^9 \left[\frac{m}{F}\right]$$

Para evaluar el campo en un punto genérico A, a una distancia r de la línea de transmisión se utiliza la ecuación 3.5; dicha ecuación da la magnitud del campo. La dirección depende de la naturaleza de la carga, si “ q ” es positiva, en una carga puntual de prueba (+ q) ubicada en A, la dirección es como se muestra en la figura 3.2, el vector va en dirección desde la carga al punto en cuestión y alejándose de la línea de transmisión.

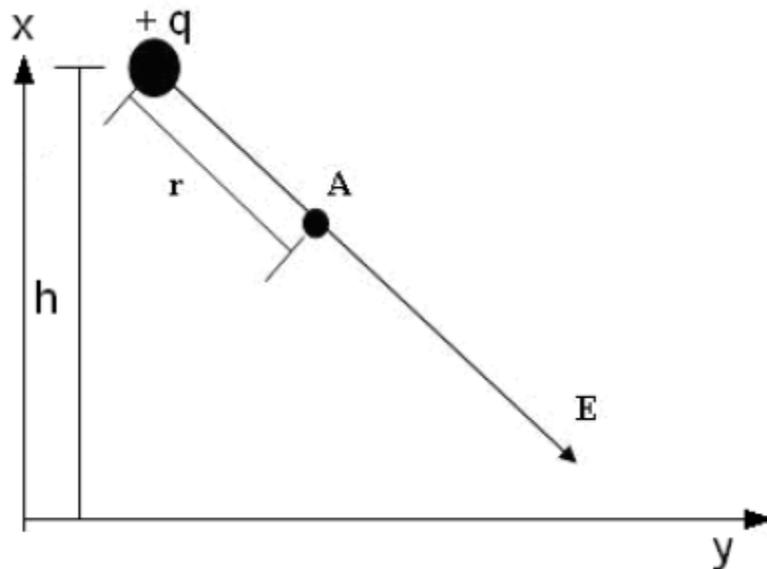


Figura 3.2. Dirección de campo debido a una carga q positiva.

Si q es negativa, la dirección del campo eléctrico \vec{E} se invierte 180° , es decir, se dirige hacia la línea de transmisión.

3.6. CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO A UN CONDUCTOR CONSIDERANDO EL EFECTO TIERRA. [11]

De acuerdo al método de las imágenes simétricas, la tierra se puede suprimir y reemplazar su efecto por una carga imagen de signo contrario al de la carga en la línea de transporte de energía eléctrica, a una distancia igual a su altura en la otra dirección (“dentro de la tierra”). En la figura 3.3. Se calcula el campo eléctrico en un punto cualquiera A debido a un conductor considerando el efecto tierra.

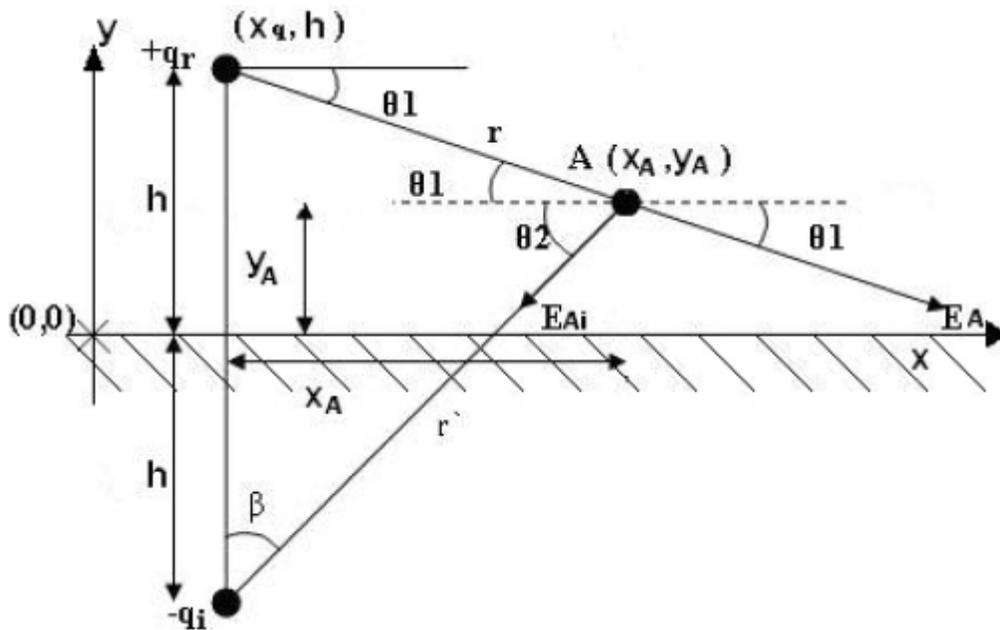


Figura 3.3. Campo eléctrico en un punto debido a un conductor considerando el efecto tierra.

Donde:

$+q_r$ conductor real.

$-q_r$ conductor imaginario.

h distancia del conductor a tierra.

E_A Campo eléctrico producido por la carga real en el punto A.

E_{Ai} Campo eléctrico producido por la carga imagen en el punto A.

Según la ecuación 3.5, el campo eléctrico en el punto A es:

$$|E_A| = \frac{(k)(q)}{r'} \quad (3.6)$$

El cual es producido por el conductor real.

$$|E_{Ai}| = \frac{(k)(q)}{r'} \quad (3.7)$$

El cual es producido por la imagen del conductor.

Las direcciones se muestran en la figura 3.3. Donde r es la distancia desde el conductor real y r' es la distancia desde el conductor imagen a un punto general llamado A.

$$r = \sqrt{(x_q - x_A)^2 + (h - y_A)^2} \quad (3.8)$$

$$r' = \sqrt{(x_q - x_A)^2 + (h + y_A)^2} \quad (3.9)$$

Descomponiendo horizontal y verticalmente los campos eléctricos y sumando algebraicamente:

$$E_x = |E_A| \cos \theta_1 - |E_{Ai}| \cos \theta_2 \quad (3.10)$$

$$E_y = -|E_A| \sin \theta_1 - |E_{Ai}| \sin \theta_2 \quad (3.11)$$

E_x : Campo eléctrico en el eje horizontal.

E_y : Campo eléctrico en el eje vertical.

$$\cos \theta_1 = \frac{x_A - x_q}{r} \quad (3.12)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{x_A - x_q}{r'} \quad (3.13)$$

$$\sin \theta_1 = \frac{h - y_A}{r} \quad (3.14)$$

$$\sin \theta_2 = \frac{h + y_A}{r'} \quad (3.15)$$

Reemplazando las ecuaciones (3.12), (3.13), (3.14) y (3.15) en (3.10) y (3.11):

$$E_x = \frac{(k)(q)}{r} * \frac{x_A - x_q}{r} - \frac{(k)(q)}{r'} * \frac{x_A - x_q}{r'}$$

$$E_x = (k)(q)(x_A - x_q) \left\{ \frac{1}{(x_q - x_A)^2 + (h - y_A)^2} - \frac{1}{(x_q - x_A)^2 + (h + y_A)^2} \right\} \quad (3.16)$$

$$E_y = - \frac{(k)(q)}{r} * \frac{h - y_A}{r} - \frac{(k)(q)}{r'} * \frac{h + y_A}{r'}$$

$$E_y = -(k)(q) \left\{ \frac{h - y_A}{r^2} + \frac{h + y_A}{(r')^2} \right\}$$

$$E_y = -(k)(q) \left\{ \frac{h - y_A}{(x_q - x_A)^2 + (h - y_A)^2} + \frac{h + y_A}{(x_q - x_A)^2 + (h - y_A)^2} \right\} \quad (3.17)$$

3.7. CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO A VARIOS CONDUCTORES CONSIDERANDO EL EFECTO TIERRA. [11]

Se obtiene el campo eléctrico en un punto general A debido a varios conductores que transportan corriente y considerando el efecto de la tierra. Figura 3.4.

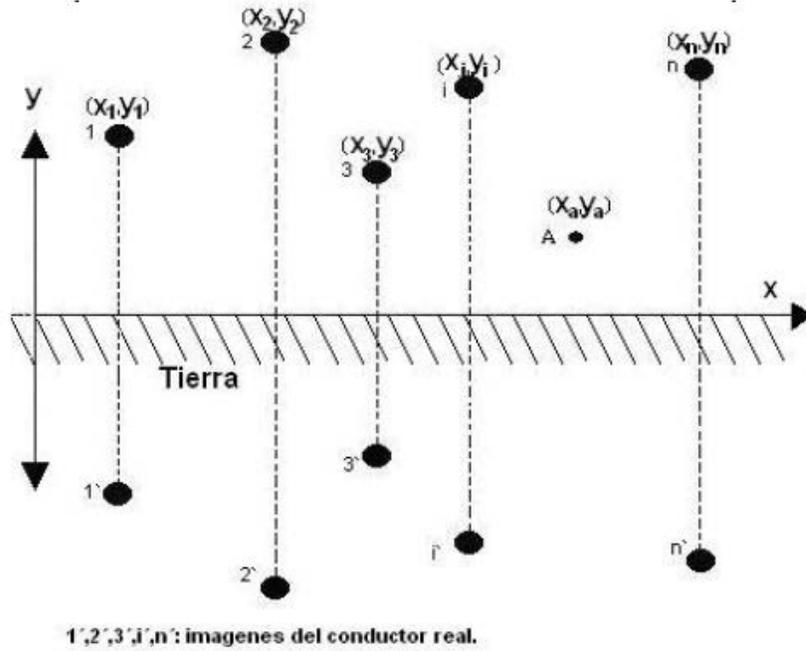


Figura 3.4. Campo eléctrico de n líneas en un determinado punto A.

$$E_{xi} = (k)(q_i)(x_A - x_i) \left\{ \frac{1}{(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2} - \frac{1}{(x_i - x_A)^2 + (y_i + y_A)^2} \right\}$$

Para los “n” conductores, el campo eléctrico total en el eje X, E_x , es:

$$E_{xi} = (k) \sum_{i=1}^n (q_i) (x_A - x_i) \left\{ \frac{1}{(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2} - \frac{1}{(x_i - x_A)^2 + (y_i + y_A)^2} \right\} \quad (3.18)$$

El campo eléctrico total en el eje Y, E_y , es:

$$E_{yi} = -(k) \sum_{i=1}^n (q_i) \left\{ \frac{y_i - y_A}{(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2} + \frac{y_i + y_A}{(x_i - x_A)^2 + (y_i + y_A)^2} \right\} \quad (3.19)$$

El campo total expresado en formal polar es:

$$E_A = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \angle \tan^{-1} \frac{E_y}{E_x} \quad (3.20)$$

3.8. CAMPO ELÉCTRICO A NIVEL DEL SUELO. [11]

En este caso $Y_A = 0$ y de la ecuación 3.18 se observa que $E_x = 0$ y solo tiene componentes E_y , el campo resultante en este caso es solo E_y , figura 3.5

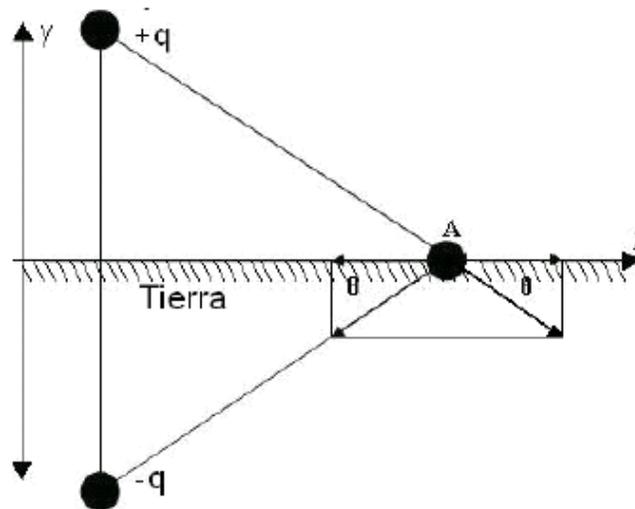


Figura 3.5. Campo eléctrico a nivel del suelo

Por la simetría que se presenta, las componentes horizontales del campo eléctrico producido por la carga real y su imagen se cancelan ya que tienen dirección opuesta e igual magnitud sin importar el tipo de carga. Las componentes verticales del campo se duplican y se dirigen a lo largo del eje vertical.

3.9. CAMPO ELÉCTRICO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO. [11]

Si las líneas de transmisión transportan corriente directa, las cargas serán invariables en el tiempo, sus valores son constantes, y así el campo en el punto A dependerá solamente de las coordenadas X_A , Y_A ecuaciones (3.18) y (3.19).

Si las líneas de transmisión transportan corriente alterna, las cargas eléctricas varían en función del tiempo (ondas sinusoidales) y por lo tanto el campo eléctrico se puede representar

como una función dependiente de las coordenadas y del tiempo (cantidad fasorial). Existen dos métodos para la solución del campo eléctrico, el primero es utilizando la forma principal en la que se presenta el campo eléctrico, la forma instantánea (método instantáneo), y la segunda es transformando está en su forma fasorial (método fasorial).

3.9.1. Método Instantáneo. [11]

La forma de calcular el campo eléctrico con el método instantáneo es obteniéndolo de las ecuaciones (3.18) y (3.19), e incluyendo la variación de la carga con el tiempo, como se muestra a continuación:

$$q_a = |q_m| \cos(\omega t + \phi) \text{ [C/m]} \quad (3.21)$$

Por ejemplo, si se tiene un circuito trifásico simple con una distribución de cargas, tenemos:

$$q_a = |q_m| \cos(\omega t) \text{ [C/m]} \quad (3.22)$$

$$q_b = |q_m| \cos\left(\omega t - \left(\frac{2\pi}{3}\right)\right) \text{ [C/m]} \quad (3.23)$$

$$q_c = |q_m| \cos\left(\omega t + \left(\frac{2\pi}{3}\right)\right) \text{ [C/m]} \quad (3.24)$$

Donde:

q_a, q_b, q_c : Cargas eléctricas por unidad de longitud en función del tiempo en cada una de las fases del circuito.

q_m : Carga máxima por unidad de longitud. [C/m]

ω : Velocidad angular.

t : Tiempo, [s].

En este caso, una vez se fije el punto a estudiar X_A , Y_A , y al reemplazar E_x y E_y se tienen que expresar en función del tiempo:

$$E_x = f_1(t)$$

$$E_y = f_2(t)$$

Es decir, las componentes (x, y) varían con el tiempo, dado que es un caso de corriente alterna. Donde f_1 y f_2 son funciones sinusoidales de igual frecuencia pero con amplitudes diferentes.

La magnitud del campo resultante para una fase también varía con el tiempo, ecuación (XX.17):

$$t = t_a \geq 0s$$

$$E_x(t_a) = f_1(t)$$

$$E_y(t_a) = f_2(t)$$

$$E_A = f_3(t) = \sqrt{f_1^2(t_a) + f_2^2(t_a)}$$

En general:

$$E_A = f_3(t) = \sqrt{f_1^2(t) + f_2^2(t)} \tag{3.25}$$

Si la ecuación (3.20) se desarrolla para una de las fases, por ejemplo la fase b, la ecuación tendría la siguiente forma:

De (3.18):

E_{x_A}

$$= k \left\{ \begin{array}{l} (q_m) \cos(\omega t) \left[\frac{1}{(x_a - x_A)^2 + (y_a - y_A)^2} - \frac{1}{(x_a - x_A)^2 + (y_a + y_A)^2} \right] + \\ (q_m) \cos\left(\omega t - \left(\frac{2\pi}{3}\right)\right) (x_A - x_b) \left[\frac{1}{(x_b - x_A)^2 + (y_b - y_A)^2} - \frac{1}{(x_b - x_A)^2 + (y_b + y_A)^2} \right] + \\ (q_m) \cos\left(\omega t + \left(\frac{2\pi}{3}\right)\right) (x_A - x_c) \left[\frac{1}{(x_c - x_A)^2 + (y_c - y_A)^2} - \frac{1}{(x_c - x_A)^2 + (y_c + y_A)^2} \right] \end{array} \right\}$$

De (3.19)

E_{y_A}

$$= -k \left\{ \begin{array}{l} (q_m) \cos(\omega t) \left[\frac{y_a - y_A}{(x_a - x_A)^2 + (y_a - y_A)^2} - \frac{y_a - y_A}{(x_a - x_A)^2 + (y_a + y_A)^2} \right] + \\ (q_m) \cos\left(\omega t - \left(\frac{2\pi}{3}\right)\right) \left[\frac{y_b - y_A}{(x_b - x_A)^2 + (y_b - y_A)^2} - \frac{y_b - y_A}{(x_b - x_A)^2 + (y_b + y_A)^2} \right] + \\ (q_m) \cos\left(\omega t + \left(\frac{2\pi}{3}\right)\right) \left[\frac{y_c - y_A}{(x_c - x_A)^2 + (y_c - y_A)^2} - \frac{y_c - y_A}{(x_c - x_A)^2 + (y_c + y_A)^2} \right] \end{array} \right\}$$

La forma práctica de resolver es:

Para un tiempo t_1 , se evalúan las cargas con (3.22), (3.23) y (3.24), luego se resuelve E_x y E_y , con (3.18) y (3.19) y se tienen las componentes del campo en un instante. Se repite ahora para un instante de tiempo diferente t_2 , y se obtienen nuevos valores de E_x y E_y . Este procedimiento se repite para tantos tiempos diferentes como se desee.

En forma general, el campo eléctrico total de la ecuación (3.25) en un solo punto tiene la forma de la figura 3.6.

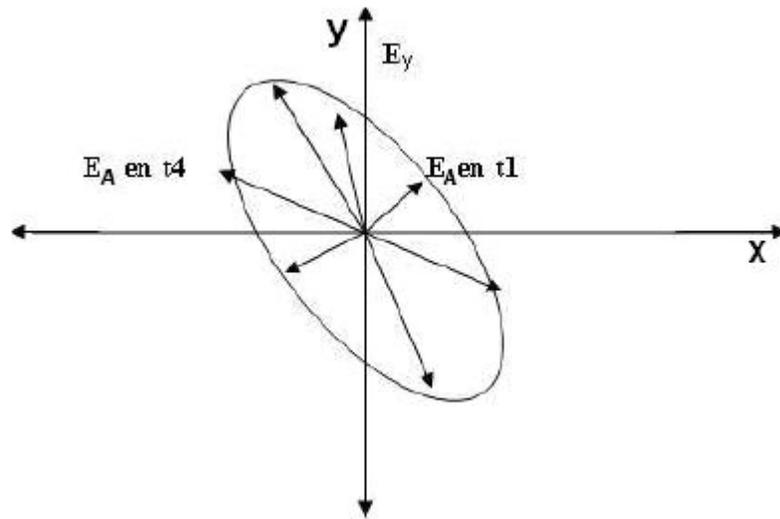


Figura 3.6. Campo eléctrico en el punto A en diferentes instantes.

3.9.2. Método Fasorial. [11]

La forma de calcular el campo eléctrico con el método fasorial es obteniéndolo de las ecuaciones (3.18) y (3.19), y representando la ecuación de la carga eléctrica sin variación en el tiempo, como se muestra a continuación, para el sistema trifásico simple, las cargas eléctricas se pueden representar en forma fasorial así:

$$q_a = |q_m/\sqrt{2}| \angle 0 [C/m] \quad (3.26)$$

$$q_b = |q_m/\sqrt{2}| \angle -120 [C/m] \quad (3.27)$$

$$q_c = |q_m/\sqrt{2}| \angle +120 [C/m] \quad (3.28)$$

Se reemplaza (3.26), (3.27) y (3.28) en las ecuaciones (3.18) y (3.19) y se obtienen E_x y E_y , en forma de fasor; y para llevar al tiempo se realizan las siguientes operaciones:

$$E_x(t) = E_x \sqrt{2} \cos(\omega t + \phi_1) \quad (3.29)$$

$$E_y(t) = E_y\sqrt{2} \cos(\omega t + \phi_2) \quad (3.30)$$

3.10. PERFIL DEL CAMPO BAJO UNA LÍNEA DE TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA A UNA ALTURA DETERMINADA. [11]

Cuando una línea de energía eléctrica transporta corrientes sinusoidales, se producen unos campos eléctricos máximos a una altura determinada, lo cual se conoce como perfil del campo eléctrico y para hallarlo se resuelven las ecuaciones (3.18) y (3.19), para un punto determinado (xi, h), se resuelve por el método fasorial como se menciono anteriormente, buscando su amplitud máxima. El proceso se repite para otros puntos del mismo proyecto, que cubran todo el ancho de la línea de transporte de energía eléctrica, figura 3.7.

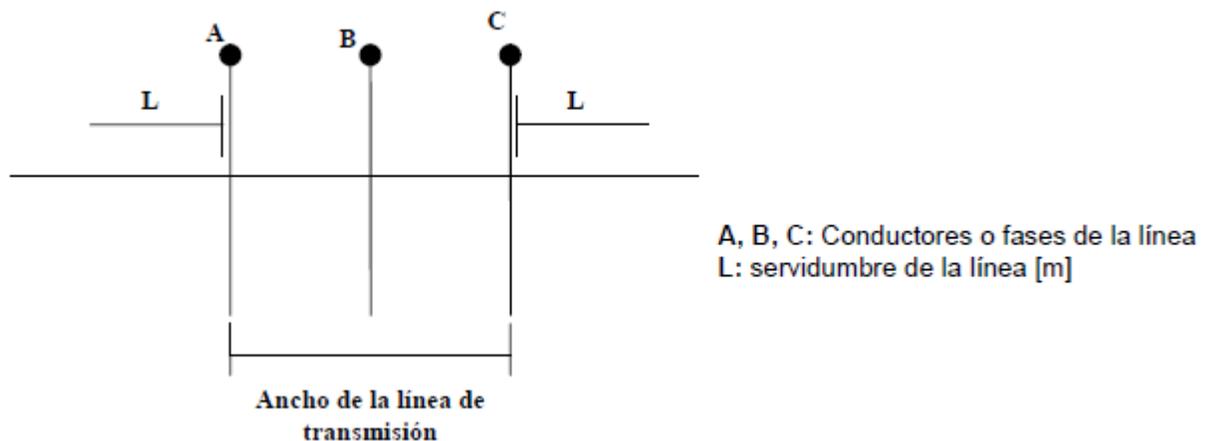


Figura 3.7. Zona de estudio del perfil de campo

Si a lo ancho de la línea de transporte de energía eléctrica se presentan terrenos con ondulaciones o pendientes, el perfil de campo eléctrico debe ser calculado para varias alturas distintas, de acuerdo a las características del terreno, figura 3.8.

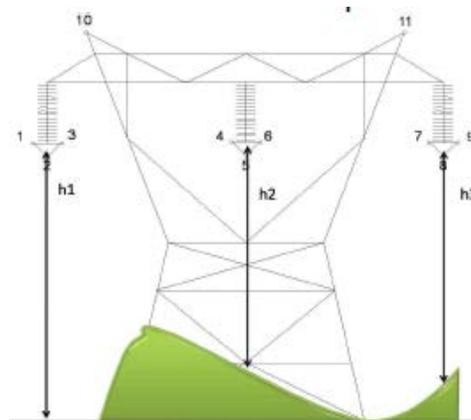


Figura 3.8. Línea de transporte de energía eléctrica en terrenos no planos

3.11. RECOMENDACIONES INTERNACIONALES DE CAMPO ELÉCTRICO. [11]

A pesar de que a nivel mundial todas las investigaciones concluyen en que no hay evidencia científica suficiente como para concluir que los campos eléctricos a baja frecuencia o industriales afectan la salud humana, han surgido una serie de recomendaciones por organizaciones tan importantes como la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP, por su sigla en inglés), las cuales generaron algunos límites recomendados para la exposición a campos eléctricos tanto a nivel de trabajadores y del público en general, tabla 3.1.

Tabla 3.1. Recomendaciones internacionales de campo eléctrico

Norma	Campo eléctrico máximo (kV/m)	
	Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP)	10
European Prestandar ENV 50166-1	5	Público en general
	25	Trabajadores
National Resources Planning Borrard NRPB, Reino Unido	10	Público en general
	12	Trabajadores
American Conference of Governmental Industrial Hygienists	10	Público en general
	25	Trabajadores

Fundamentos electrónicos

En este capítulo se presentan los fundamentos electrónicos que se tomaron en cuenta para el diseño y construcción del prototipo detector de presencia/ausencia de voltaje para baja, media y alta tensión, considerando los dispositivos y circuitos utilizados, como lo son el amplificador de instrumentación, amplificadores operacionales y módulo de radiofrecuencia etc.

Para el diseño y construcción del prototipo detector de presencia/ausencia de voltaje para baja, media y alta tensión, se tomo como principio de operación la detección de campo eléctrico cercano de las instalaciones eléctricas que se requiera verificar; en base a lo cual y de acuerdo a otros factores, ya sea de diseño, economía y portabilidad, se definió el conjunto de circuitos que conforman el dispositivo desarrollado, por lo que antes de hablar de cada una de las etapas del mismo, es conveniente definir los fundamentos electrónicos en los que se ha basado este proyecto.

4.1. AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN (AI). [12] [13] [14]

El amplificador de instrumentación es uno de los amplificadores más útiles, precisos y versátiles de que se dispone en la actualidad, utilizado para tomar mediciones en ambientes donde la señal de interés es muy difícil de registrar, está diseñado para tener una alta impedancia de entrada, un alto rechazo al modo común (CMRR) y bajas variaciones por efectos de temperatura; mostrado en la figura 4.1 se representa por un bloque de ganancia en lazo cerrado con una entrada diferencial y una salida con respecto a una referencia, cuya ganancia se programa a través de una sola resistencia, que puede ser externa o interna. El diseñador provee una ecuación en la hoja de especificaciones de cada uno de estos circuitos integrados para calcular los valores de resistencia para una ganancia deseada. Está provisto con una entrada de referencia que elimina los problemas de aterrizaje que tienen los AO convencionales, además que pueden utilizar entradas con AO tipo Transistor de efecto de campo (Field-Effect Transistor o FET, en inglés) o bipolar, teniendo en cuenta que los de entrada FET tienen corrientes de polarización (bias) muy bajas por lo que son muy buenos para usar con altas impedancias de entrada.

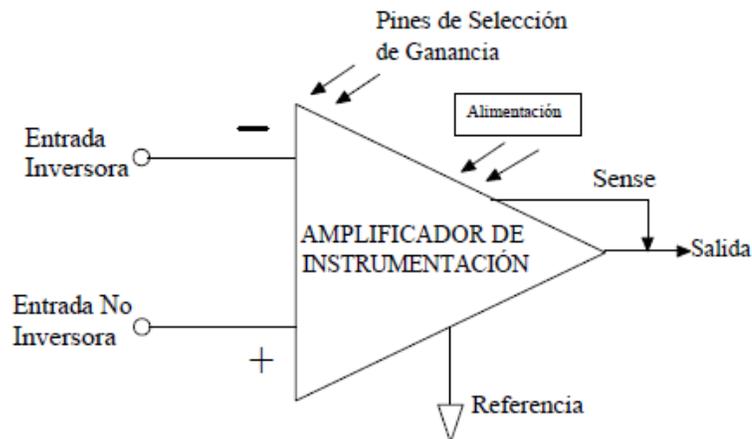


Figura 4.1. Amplificador de instrumentación.

El AI puede ser construido por dos etapas de AO o por 3 etapas de estos mismos, la configuración clásica de 3 AO es la utilizada en este proyecto, mostrada en la figura 4.2, formado por tres amplificadores operacionales y siete resistencias, se puede construir a base de componentes discretos o se puede encontrar encapsulado (por ejemplo el INA121).

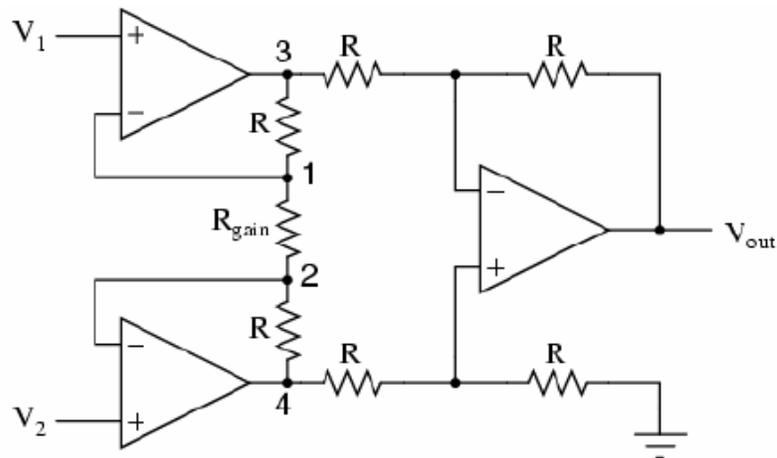


Figura 4.2. Configuración clásica de 3 Amplificadores Operacionales (AO).

El circuito está compuesto por dos partes: El amplificador diferencial en la derecha toma la diferencia de voltaje en los puntos 3 y 4, y la amplifica. Los seguidores de tensión a la entrada dan la característica de amplificador diferencial con gran impedancia de entrada y ganancia ajustable por medio de R_{gain} . La operación que realiza es la resta de sus dos entradas

multiplicada por un factor. Los amplificadores de instrumentación son utilizados para medir señales muy pequeñas y ruidosas las cuales van de los micro volts a mili volts, éstos amplifican las dos señales de entrada y rechazan o atenúan la señal común en ambas entradas, a esta diferencia la multiplican por la ganancia deseada. Los amplificadores de instrumentación por su composición son capaces de detectar y amplificar señales demasiado pequeñas, es por eso que son utilizados para fines de instrumentación médica y militar, entre otras de gran precisión y exactitud. Un amplificador de instrumentación es un amplificador de diferencias que satisface las siguientes especificaciones:

- a) Impedancias de entrada de modo diferencial y común altas en extremo (infinitas, en forma ideal).
- b) Impedancia de salida muy baja (idealmente, cero).
- c) Ganancia exacta y estable, por lo común en el rango de $1 - 10^3$ V/V.
- d) Razón de rechazo, por lo general extremadamente elevada.
- e) Bajo nivel de la tensión de offset del amplificador y baja deriva en el tiempo y con la temperatura, a fin de poder trabajar con las señales de continua muy pequeñas.

El amplificador diferencial básico construido con un único amplificador operacional, satisface algunas de las características del amplificador de instrumentación, pero no todas. No obstante, como es la base de los amplificadores de instrumentación es interesante analizar algunas de sus características. Un amplificador diferencial es muy versátil de manera que se puede utilizar tanto como amplificador inversor como no inversor. Dado un amplificador diferencial como el de la figura 4.3, la salida V_0 sería:

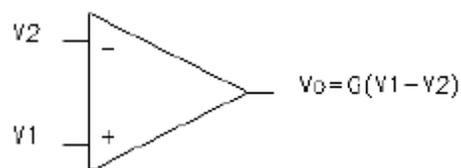


Figura 4.3. Configuración del amplificador diferencial.

Si $V_2 = 0$, entonces $V_0 = G V_1$ y funcionaría como un amplificador no inversor. Por otro lado si $V_1 = 0$, entonces $V_0 = -G V_2$ y actuaría como un amplificador inversor. Y además, puede amplificar la diferencia. Sin embargo, la verdadera razón para trabajar con amplificadores diferenciales proviene de la facilidad que poseen para trabajar con señales diferenciales frente a las de modo común, es decir, nos va a permitir distinguir entre señal y ruido.

4.2. AMPLIFICADORES OPERACIONALES (AO). [12] [13] [14]

El amplificador operacional es un circuito integrado compuesto por una gran cantidad de transistores, se considera como un bloque con terminales de entrada y salida. Este circuito es muy popular debido a su gran versatilidad, pueden ser usados en múltiples configuraciones y prestaciones. Dentro de la gran cantidad de aplicaciones de este dispositivo podemos mencionar aplicaciones en los sistemas electrónicos de control industrial, en instrumentación nuclear, instrumentación médica, en equipos de telecomunicaciones, audio y video, entre muchas otras.

El diagrama de un amplificador es mostrado en la Figura 4.4. Donde podemos apreciar las terminales con las que cuenta. Los amplificadores operacionales tiene la característica de amplificar la diferencia de potencial que aparezca en sus terminales V_+ y V_- dándole una ganancia A , idealmente infinita; $V_{out} = A(V_+ - V_-)$.

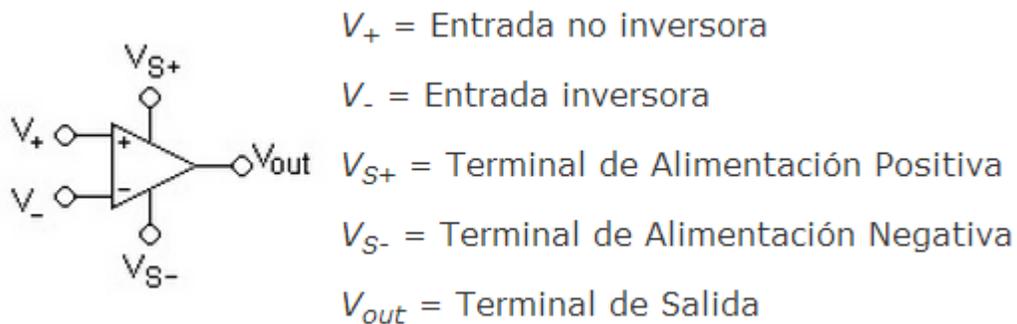


Figura 4.4. Amplificador operacional

Se considera el modelo de amplificador operacional ideal como aquel circuito que cuenta con las siguientes características:

- Impedancia de entrada infinita, es decir, que la corriente neta que entra al amplificador por las terminales no inversora e inversora es cero.
- Impedancia de salida cero.
- Ganancia de modo común cero, esto se traduce al hecho de que al aplicar voltajes iguales a las entradas, la salida del amplificador deberá ser cero.
- Ganancia de lazo abierto A infinita, en otras palabras, se puede amplificar el factor (V_+ - V_-) a valores infinitos.
- Ancho de banda infinito, esto es que los amplificadores operacionales ideales pueden amplificar señales en los rangos de frecuencias de 0 a infinito con una ganancia infinita.

Sin embargo, estas características no pueden ser alcanzadas del todo en la realidad, un ejemplo muy simple es el hecho que no podemos dar ganancias infinitas, ya que el amplificador operacional real solo puede dar una ganancia dependiendo del rango de sus fuentes de alimentación, dar una ganancia infinita equivaldría a tener fuentes de alimentación infinitas, lo cual no es posible en la práctica; mientras que por el lado de las impedancias de entrada infinitas, tampoco es posible, pero en el mercado existen amplificadores que tienen impedancias de entrada de varios cientos de mega ohms, con lo que se pueden hacer aproximaciones al modelo del amplificador operacional ideal.

Tabla 4.1. Comparación de las características de un AO ideal vs un AO real.

Característica de un Amp. Op. Ideal	Característica de un Amp. Op. Real
Resistencia de entrada (R_i) infinita	Resistencia de entrada (R_i) $> 1 \text{ M}\Omega$
Resistencia de salida (R_o) cero	Resistencia de salida (R_o) $< 100 \Omega$
Ganancia de tensión en lazo abierto (A_v) infinita	Ganancia de tensión en lazo abierto (A_v) hasta aprox. 106
Ancho de banda infinita	Ancho de banda = 1 Mhz.
Ganancia en modo común (A_c) cero	

La utilidad general de un amplificador operacional se relaciona prácticamente con la realimentación. Hay dos tipos de realimentación en amplificadores: realimentación positiva y realimentación negativa. La realimentación negativa ayuda a disminuir la distorsión generada internamente por los amplificadores, reduce la resistencia de salida y la realimentación positiva brinda la posibilidad de aumentar el ancho de banda del amplificador. El problema fundamental de la realimentación positiva es que se pueden presentar oscilaciones y volver inestable el amplificador y el circuito en general.

Las condiciones ideales de ganancia infinita, resistencia de entrada infinita y resistencia de salida cero, que se hacen en el análisis del amplificador operacional ideal no se cumplen en los amplificadores operacionales reales. Se encuentran ciertas limitaciones y características que pueden ser medidas mediante circuitos especiales y deben de ser tenidas en cuenta en cualquier aplicación.

Haciendo un análisis en corriente directa (CD) y de ganancia en baja frecuencia, se demuestra que la ganancia es típicamente limitada por una realimentación térmica más que por las características eléctricas. En el proceso de transmisión de potencia, la etapa de salida del amplificador, disipa internamente unos niveles de potencia parecidos que causan que la temperatura del circuito integrado aumente en proporción a esta potencia. Si la constante de realimentación térmica es mayor que la constante de realimentación eléctrica, la ganancia del amplificador de realimentación cambiará de fase por 180°, volviendo la realimentación positiva en negativa. Por esto se debe determinar una "Ganancia máxima utilizable". A altas frecuencias donde los efectos térmicos pueden ser ignorados, el comportamiento del amplificador operacional es puramente electrónico. Existen resistencias parásitas tanto en la entrada y en la salida del amplificador que generan voltajes indeseados, además debido a que el amplificador operacional real debe de ser polarizado, se inducen también voltajes y corrientes que afectan el desempeño ideal del dispositivo. En este rango el ancho de banda limitado, también ocasiona problemas de linealidad y saturación en el amplificador. Dentro de las configuraciones utilizadas en la realización de este proyecto se encuentran las siguientes:

4.3. CIRCUITO SEGUIDOR DE TENSIÓN. [12] [13] [14]

También conocido como seguidor de fuente, amplificador de ganancia unitaria, aislador (búfer) o amplificador de aislamiento. Es aquel circuito que proporciona a la salida la misma tensión que a la entrada, se utiliza para eliminar efectos de carga (aislamiento de etapas), para refuerzo de corrientes ó para adaptación de impedancias (conectar un dispositivo con gran impedancia a otro con baja impedancia y viceversa). La figura 4.5 muestra la configuración denominada seguidor de tensión:

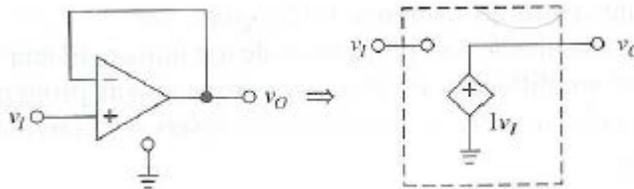


Figura 4.5. Configuración seguidor de tensión y su circuito equivalente ideal.

Presenta la ventaja de que la impedancia de entrada es elevadísima, la de la salida prácticamente nula, y puede ser útil, por ejemplo, para poder leer la tensión de un sensor con una intensidad muy pequeña que no afecte apenas a la medición. Es un circuito muy recomendado para realizar medidas de tensión lo mas exactas posibles, pues al medir la tensión del sensor, la corriente pasará tanto por el sensor como por el dispositivo, y la tensión a la entrada de este, dependerá de la relación entre la resistencia del mismo dispositivo y la resistencia del resto del conjunto formado por el sensor, cableado y conexiones. Por ejemplo, si la resistencia interna en un voltímetro es R_e (entrada), la resistencia de la línea del cableado es R_l y la resistencia interna del sensor es R_g , entonces la relación entre la tensión medida por el voltímetro (V_e) y la tensión generada por el sensor (V_g) será la correspondiente a este divisor:

$$V_e = \frac{R_e}{R_g + R_l + R_e} \cdot V_g \quad (4.1)$$

Así tenemos, que si la resistencia de entrada del amplificador es mucho mayor que la del resto del conjunto, la tensión de entrada del amplificador será prácticamente la misma que la generada por el sensor y se podrá despreciar la caída de tensión en el sensor y cableado.

4.4. CIRCUITO RECTIFICADOR DE PRECISIÓN. [12] [13] [14]

Un diodo rectificador común no consigue rectificar señales de niveles muy bajos, ya que no conduce cuando esta polarizado directamente con tensiones inferiores a su tensión de umbral (0.7V suponiendo un diodo de silicio). Sin embargo, en ocasiones, se necesita rectificar señales de decenas de mili volts o menos, por ejemplo cuando éstas provienen de sensores o transductores utilizados en instrumentación industrial o bioelectrónica. En la figura 4.6 tenemos la configuración del circuito rectificador de media onda básico o superdiodo.

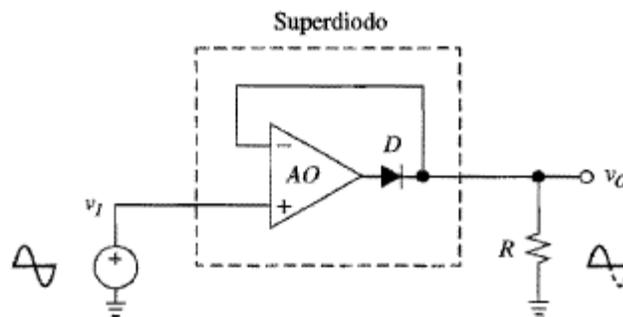


Figura 4.6. Circuito rectificador de media onda básico o superdiodo.

Un rectificador de media onda es un circuito que sólo pasa la porción positiva (o sólo la porción negativa) de una onda, mientras que bloquea la otra porción. La característica de transferencia del circuito, mostrado en la figura 4.6, está dada por:

$$V_o = V_1 \text{ para } V_1 > 0 \quad (4.2)$$

$$V_o = 0 \text{ para } V_1 < 0 \quad (4.3)$$

El análisis de este circuito, se facilita si se consideran por separado dichas características:

1. $V_1 > 0$: En respuesta de una entrada positiva, la salida del amplificador operacional también se volverá positiva, encendiendo el diodo y creando por lo tanto la ruta de retroalimentación negativa mostrada en la figura 4.7a. Esto permite aplicar el principio de corto virtual y tener $V_o = V_1$. Se observa que para hacer que V_o siga a V_1 , el amplificador operacional aplica a su salida una caída de diodo por encima de V_o , esto es, $V_{AO} = V_o + V_{D(\text{enc})} \approx V_o + 0.7V$. Al colocar el diodo dentro del ciclo de retroalimentación se elimina cualquier error debido a su caída de voltaje. Para enfatizar este efecto de la retroalimentación negativa, la combinación diodo-amplificador operacional se conoce como superdiodo, prácticamente no existe caída de tensión en el diodo durante el proceso de rectificación.
2. $V_1 < 0$: Ahora la salida del amplificador operacional se vuelve negativa, apagando el diodo y por ende causando que la corriente a través de R se convierta en cero. Por lo tanto $V_o = 0$. Como en ilustra en la figura 4.7b, el amplificador operacional ahora está operando en el modo de lazo abierto.

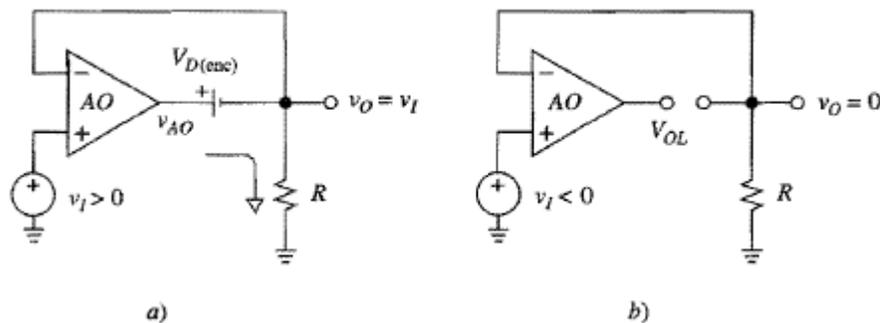


Figura 4.7. Circuitos equivalentes del rectificador de media onda básico para entradas a) positivas y b) negativas.

Una desventaja de este circuito es que no rectifica correctamente si la señal de entrada es de una frecuencia elevada, esto se debe a que el operacional tiene un slew-rate muy lento y tarda demasiado en cambiar de $-V$ a 0 . Lo cual para fines prácticos de este proyecto no es inconveniente debido a que se trabajara a la frecuencia industrial de 60 Hz , estando dentro del rango de súper baja frecuencia por sus siglas en ingles, SLF.

4.5. CIRCUITO COMPARADOR. [12] [13] [14]

En muchas situaciones surge la necesidad de comparar dos señales entre sí, siendo una de ellas una referencia preestablecida por el diseñador; los circuitos electrónicos destinados a esta función se denominan comparadores. La salida del comparador consta de impulsos discretos que dependen del nivel de la señal aplicada. La salida del comparador esta siempre en un valor “alto”, denominado saturación positiva ($+V_{sat}$), o en otro “bajo”, llamado saturación negativa ($-V_{sat}$), aunque hay varias formas de limitar los niveles de salida para que no se produzca la saturación, lo cual depende de la aplicación a desarrollar. Cuando la velocidad no es crítica, un amplificador operacional se puede convertir en un excelente comparador, en especial en vista de las ganancias extremadamente altas y de los bajos desvíos de entrada disponibles en muchos tipos comunes de amplificadores comerciales.

Básicamente existen dos tipos de comparadores, el no inversor y el inversor. En el primer caso la señal de referencia se aplica a la entrada inversora del AO y la señal de la variable que se va a comparar a la no inversora. La figura 4.8a muestra el circuito elemental de un comparador no inversor con la señal de referencia puesta a tierra y la figura 4.8b muestra la respuesta del circuito. Se hace notar que para este caso, la referencia esta puesta a tierra por lo que los estados de salida se conmutan cuando la señal de entrada para por cero, por lo que este circuito se denomina detector de paso por cero. La operación de este circuito es bastante sencilla; tenemos que la alta ganancia del AO en lazo abierto, amplifica la diferencia de tensión existente entre sus entradas inversora y no inversora, con lo que la salida tomara el valor $+V_{sat}$ o $-V_{sat}$, según sea la diferencia positiva o negativa, respectivamente, es decir:

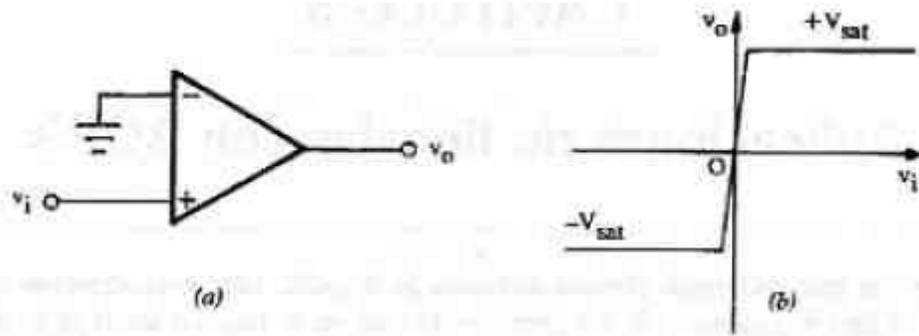


Figura 4.8. Comparador No inversor: a) Circuito elemental y b) Respuesta del circuito.

$$V_o = \begin{cases} +V_{sat} & \text{cuando } V_i > 0 \\ -V_{sat} & \text{cuando } V_i < 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

El segundo tipo básico de comparador es el inversor; en este caso la referencia está conectada a la entrada no inversora y la señal de la variable que vamos a comparar en la inversora. La figura 4.9a muestra el circuito de un comparador inversor con la señal de referencia nuevamente puesta a tierra y la figura 4.9b muestra la respuesta del mismo. Este circuito también denominado detector de paso por cero, con su operación análoga al anterior; cuando la diferencia de tensión entre sus entradas (inversora y no inversora) es negativa, la salida toma el valor de $+V_{sat}$ y cuando es positiva, la salida se pone a $-V_{sat}$, esto es:

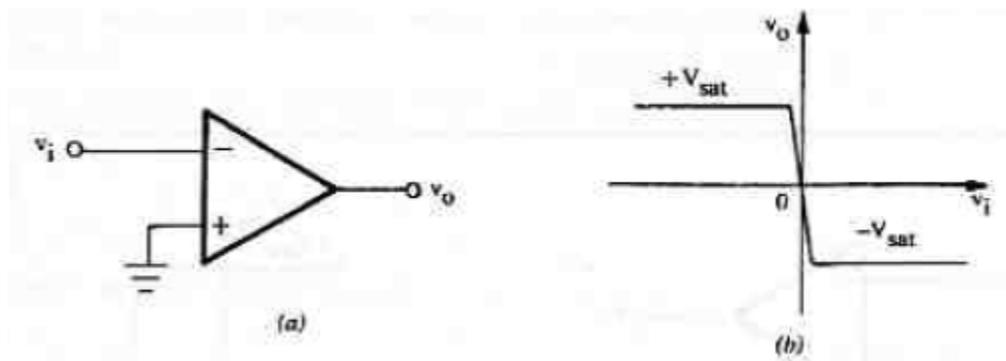


Figura 4.9. Comparador inversor: a) Circuito elemental y b) Respuesta del circuito.

$$V_o = \begin{cases} +V_{sat} & \text{cuando } V_i < 0 \\ -V_{sat} & \text{cuando } V_i > 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

En los circuitos básicos mostrados anteriormente, la señal de referencia era nula por estar conectada a tierra, sin embargo, es posible utilizar como referencia una señal $V_{ref} \neq 0$; independientemente de la configuración utilizada, existen diversas formas de realizar circuitos con referencias no nulas, siendo importante resaltar, que la conmutación de estados tendrá lugar cuando el nivel de la señal que se requiere comparar alcance el valor de referencia V_{ref} , razón por la cual también se les denomina detectores de paso por nivel prefijado, la figura 4.10a muestra el circuito elemental de un comparador inversor con la señal de referencia $V_{ref} \neq 0$ y la figura 4.8b muestra la respuesta del circuito:

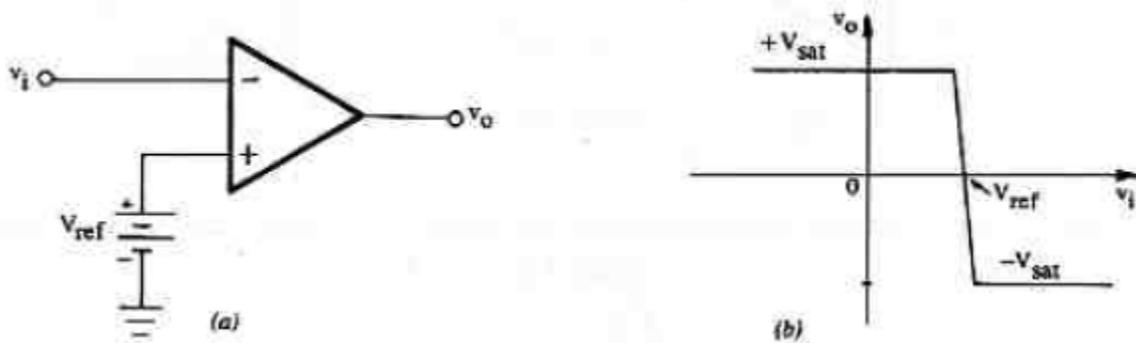


Figura 4.10. Comparador con $V_{ref} \neq 0$: a) Circuito elemental y b) Respuesta del circuito.

$$V_o = \begin{cases} +V_{sat} & \text{cuando } V_i < V_{ref} \\ -V_{sat} & \text{cuando } V_i > V_{ref} \end{cases} \quad (4.6)$$

En la práctica, al proyectar circuitos comparadores, es habitual la utilización de dos diodos en anti paralelo, colocados entre los terminales de entrada, para proteger la etapa diferencial contra posibles sobretensiones o sobrecorrientes que pudieran dañar al circuito integrado.

4.6. MÓDULO DE RADIOFRECUENCIA (RF). [15]

A la hora de pensar en diseñar sistemas radio controlados, surgen más de una opción para llevar a cabo nuestro proyecto en lo que respecta al transmisor y receptor que emplearemos para el envío y recepción de las órdenes. Hace un tiempo atrás la única

posibilidad, económica, era la construcción y calibración del circuito transmisor y receptor, lo que implicaba dedicar un tiempo importante para conseguir este objetivo. Hoy en día disponemos a un costo razonable módulos de RF, transmisor y receptor diseñados para ponerlos a funcionar con pocos componentes adicionales.

Los módulos de RF se emplean principalmente para aplicaciones tales como en controles remotos, sistemas de seguridad, identificación y transmisión periódica de datos. Estos sistemas están conformados por un par de módulos: uno transmisor y otro receptor (para comunicaciones en un solo sentido), o por pares de transceptores (que permiten comunicación de doble vía). La mayoría de estos pares emplean tecnologías de modulación ASK (conmutador de desplazamiento de amplitud) y FSK (conmutador de desplazamiento de frecuencia), y solo necesitan una antena como elemento externo. Estos pares de módulos presentan una sintonía fija a una frecuencia determinada, como por ejemplo 315 MHz., 418 MHz., 433 MHz en frecuencia ultra alta, UHF, por sus siglas en inglés.

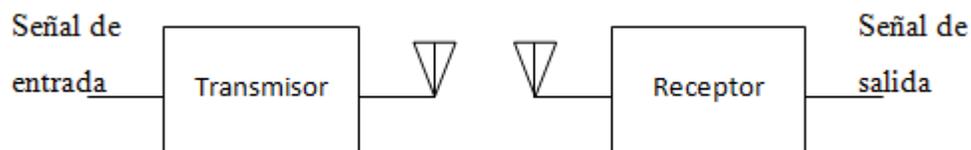


Figura 4.11. Módulo de RF.

La mayoría de los módulos transmisores de RF utilizan un esquema de modulación ASK (Amplitude Shift Keying -modulación por desplazamiento de amplitud). Esto les confiere ciertas particularidades propias del esquema de modulación y de su forma de detección, que deberán ser tenidas en cuenta si se va a diseñar un sistema propio de codificación y decodificación, o de comunicaciones. En el esquema de modulación ASK, las señales de datos ocasionan que la amplitud de la señal portadora varíe entre dos estados. Generalmente, se utiliza lo que se conoce como OOSK u OOK (On-Off Shift Keying u On-Off Keying), que consiste en transmitir la señal portadora ante un estado lógico y anularla en el otro.

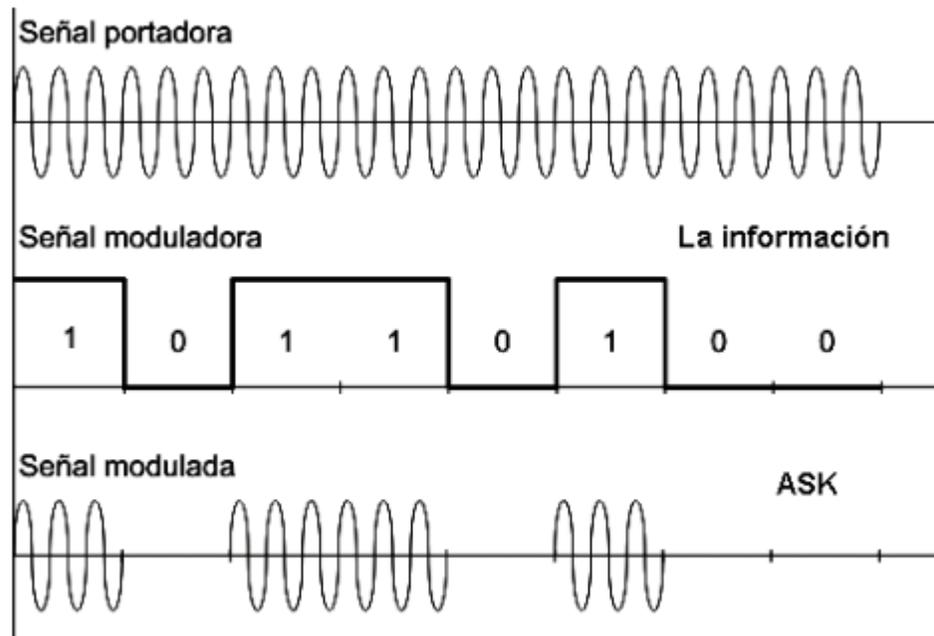


Figura 4.12. Modulación de la señal portadora

Los módulos receptores, en su mayoría, suelen ser circuitos súper-regenerativos, con un detector de umbral a la salida. Un receptor de este tipo presenta un ruido a la salida bastante importante, en ausencia de señal. El detector trata de ajustar el umbral automáticamente, y en ausencia de portadora se ajustará al valor medio de excursión del receptor, pudiendo responder a picos de ruido, y presentando a la salida del módulo pequeñas transiciones muy breves y esporádicas, ocasionadas por la excursión de la señal de ruido a la salida del receptor, que momentáneamente excede el umbral del detector y su histéresis. Si bien el comportamiento específico dependerá del diseño de cada módulo receptor en particular y del estado de la banda de operación en el lugar de funcionamiento, es de esperar tener pequeños y frecuentes “pulsitos” a la salida cuando no tenemos señal de entrada, es decir, cuando el módulo transmisor no está transmitiendo.

En presencia de una portadora constante, la señal de salida del módulo receptor permanecerá indicando el estado correspondiente (generalmente 1 lógico) durante un tiempo, pero en muchos casos retornará nuevamente al estado inactivo, debido a que estos módulos suelen estar diseñados para trabajar con señales que varían constantemente (señales de datos)

y no para transmitir estados lógicos permanentes. En presencia de una señal de datos, el detector ajustará el umbral a la excursión del receptor y tratará de reproducir lo más fielmente la señal de datos, no obstante, debido a detalles constructivos como por ejemplo el tiempo de arranque del oscilador del transmisor, demora en la detección del receptor, y capacidades circuitales que agregan tiempos de carga y descarga, es posible que aparezca una pequeña modificación del ciclo de trabajo de la señal, es decir, puede que si se transmiten unos y ceros de igual duración, resulte uno de los períodos levemente distinto del otro. Esta modificación, si existe, suele ser del orden de los microsegundos.

Los módulos se deben utilizar (es conveniente) con algún codificador del lado del transmisor y un decodificador del lado del receptor. De este modo se asegura que las órdenes que deseamos que se ejecuten del lado del receptor lleguen adecuadamente y sin errores, mientras estemos dentro del alcance del enlace RF creado. Los codificadores y decodificadores mas recomendados son los utilizados para control remoto en sistemas de seguridad, HT12E (codificador) y HT12D (decodificador), respectivamente. Este juego de integrados codifica y decodifica una palabra de 12 bits, compuesta por una dirección de 8 bits y una sección de datos de 4 bits. Con esta cantidad de bits se pueden comandar 256 dispositivos diferentes, enviándoles hasta 16 comandos distintos a cada uno.

4.7. LA ANTENA DEL TRANSMISOR Y DEL RECEPTOR. [15]

La antena puede ser de tipo látigo y por tanto debe medir un cuarto de la longitud de onda ($\lambda / 4$) de la onda portadora. La letra griega λ (lambda) se utiliza para representar la longitud de onda, la longitud de una onda es el período espacial de la misma, es decir, la distancia a la que se repite la forma de la onda. La frecuencia de la portadora será 433 MHz que es la frecuencia a la que opera el módulo transmisor. Las ondas electromagnéticas se propagan a una velocidad que en el vacío es: $C= 300.000 \text{ Km/s}$. Podemos asumir que esa también es la velocidad a la que se propagan en el aire.

La fórmula que relaciona longitud de onda, frecuencia, y velocidad de propagación es:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4.7)$$

Podemos calcular la longitud de onda y luego la longitud de la antena:

$$\lambda = \frac{300000000}{433000000} = 0.69 \text{ m} \quad \lambda/4 = 0.17\text{m} = 17\text{cm}. \quad (4.8)$$

Por lo tanto podemos usar como antena un cable de 17 cm. de largo tanto para el transmisor como para el receptor. Se podría eventualmente experimentar con variaciones alrededor de esta longitud dependiendo las características de funcionamiento que requiera.

Capítulo

5

Desarrollo del proyecto

En este capítulo se presenta el desarrollo del proyecto, contemplando la descripción del prototipo detector de presencia/ausencia de voltaje para baja, media y alta tensión, considerando el elemento detector, el acoplamiento de impedancias, la etapa de amplificación, la etapa de manipulación de la señal, y la etapa de transmisión y recepción en radiofrecuencia.

5.1. DESCRIPCIÓN DEL DETECTOR DE PRESENCIA/AUSENCIA DE VOLTAJE PARA BAJA, MEDIA Y ALTA TENSIÓN.

El dispositivo detector de voltaje no necesitará tomar contacto físico con la parte energizada en las instalaciones, si no que será suficiente acercarlo, por ejemplo a la base del aislamiento, en la estructura soporte de los equipos, en el caso de una subestación para alta y/o media tensión; o en la cercanía de la distancia de seguridad para barras o buses en el caso de tableros de media tensión o en la proximidad de equipo e instalaciones para baja tensión. El dispositivo detector de voltaje captará el campo eléctrico formado entre la parte energizada de la instalación y tierra, esto lo haría apto para verificaciones incluso en climas húmedos ya que no se invadiría la distancia de seguridad, pero por motivos de seguridad las actividades y maniobras en instalaciones eléctricas a la intemperie en este tipo de condiciones se limitan al mínimo, exceptuando solo emergencias. Por otro lado su tamaño, peso y medidas permiten que las mediciones se puedan hacer con cierta facilidad. La frecuencia de operación es de 60 Hz y la alimentación del prototipo será proporcionada por baterías alcalinas para mayor flexibilidad y portabilidad. Las características eléctricas para rango de operación de acuerdo al nivel de voltaje serán:

Baja tensión < 600V

600V < Media tensión < 40kV

Alta tensión > 40kV

El dispositivo detector de voltaje está integrado por tres partes principales:

- a. Módulo detector: Formado por el detector de tensión en conjunto con una serie de circuitos para el acondicionamiento, manipulación y transmisión en radiofrecuencia (RF) de la señal, montados sobre una carcasa protectora la cual tiene una base para ajustarse al elemento extensible.
- b. Elemento extensible: Compuesto por una pértiga aislante telescópica con cabezal universal donde se montará el elemento detector; ligera y de fácil manejo para este tipo de actividades.

- c. Módulo de salida: Conformado por el receptor de RF y una salida audiovisual, lo que permite hacer más eficiente la verificación de la presencia/ausencia de voltaje en condiciones de ruido extremo o demasiada luminosidad, teniendo el elemento detector en la zona próxima del equipo a verificar y el elemento de salida en la cercanía del operador.

La implementación del prototipo detector de presencia/ausencia de voltaje para baja, media y alta tensión se desarrollo en varias etapas, las cuales en conjunto conforman el prototipo finalizado; dichas etapas corresponden a la adquisición y acondicionamiento de la señal, la manipulación de la misma, la transmisión y recepción en RF, y finalmente la etapa de salida. La figura 5.1 muestra el diagrama a bloques del prototipo.

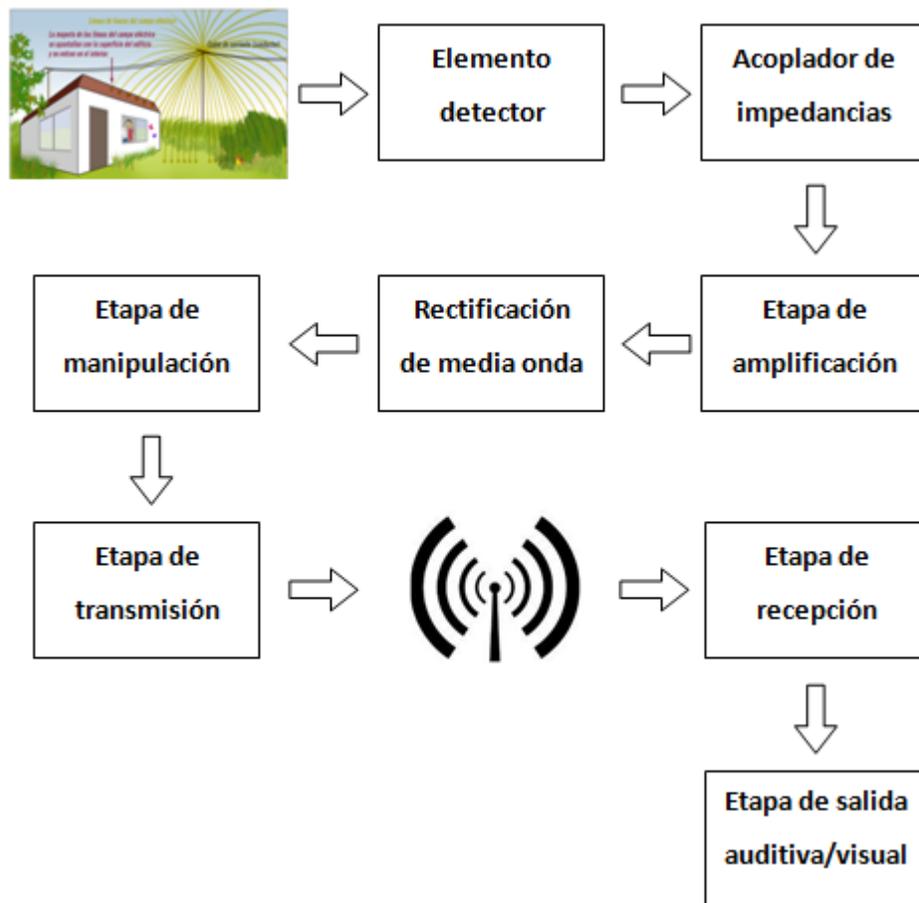


Figura 5.1. Diagrama a bloques del prototipo detector de presencia/ausencia de voltaje.

5.2. ELEMENTO DETECTOR.

Lo primero a ser considerado antes de desarrollar las etapas de este proyecto, fue el tipo de elemento detector que se utilizó; de acuerdo al principio de funcionamiento basado en la detección del campo eléctrico y tomando en cuenta la ausencia de contacto físico entre las instalaciones a verificar y el dispositivo verificador, tendremos que a partir de los fenómenos del campo eléctrico actuando sobre un material conductor, se creará una diferencia de potencial la cual inducirá un voltaje que propiciará el movimiento de electrones para que se produzca una corriente eléctrica en el dispositivo detector. Tomando en cuenta estas características y por simplicidad de diseño y portabilidad, se implementó como elemento detector una placa de cobre de 0.002 m^2 .

Se consideró el nivel de voltaje donde se realizará la verificación de la presencia/ausencia de tensión, no de la intensidad de corriente; además de la distancia desde la instalación a verificar hasta el prototipo detector.

5.3. ACOPLAMIENTO DE IMPEDANCIAS.

El acoplo por campo eléctrico induce un voltaje en el circuito de prueba, por lo que la impedancia de entrada del circuito de prueba afectará de manera notable el voltaje inducido por los fenómenos de campo eléctrico actuando sobre el elemento detector, de esta manera al probar diferentes valores de acoplamiento de impedancia y teniendo en cuenta que los circuitos con altas impedancias son más sensibles a los efectos de campo eléctrico, se logró determinar la sensibilidad adecuada para los diferentes rangos de operación del dispositivo, donde por medio de un selector se elegirá el rango de operación deseado, ya sea: baja, media o alta tensión.

5.4. ETAPA DE AMPLIFICACIÓN.

En la etapa de amplificación se utilizó un amplificador de instrumentación, el cual debe cumplir las siguientes características para tener un buen rendimiento en la adquisición de señales:

- Impedancia de entrada $\geq 10^9 \Omega \parallel 2 \text{ pF}$.
- CMRR $\geq 90 \text{ dB}$.
- Corriente de polarización $\leq 20 \text{ nA}$.

Tomando en cuenta estas características, se determinó utilizar el amplificador de instrumentación de entrada tipo FET y de bajo consumo, INA121 de BURR-BROWN, el cual tiene las siguientes características:

- Impedancia de entrada $\geq 10^{12} \Omega \parallel 12 \text{ pF}$.
- CMRR $\geq 106 \text{ dB}$.
- Corriente de polarización $\leq \pm 4 \text{ pA}$.
- Fuente de alimentación desde ± 2.25 a $\pm 18 \text{ V}$.

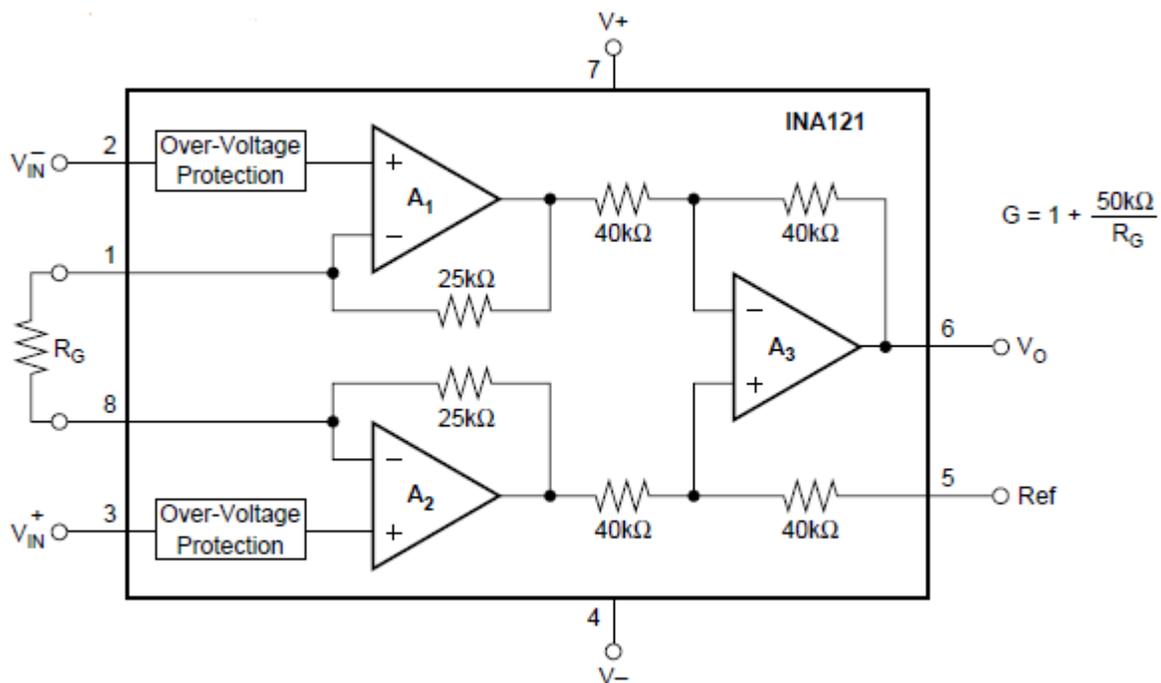


Figura 5.2. Diagrama del amplificador de instrumentación INA121 de BURR-BROWN.

La figura 5.3 muestra las conexiones básicas requeridas para la operación del INA121 y su representación en forma simplificada:

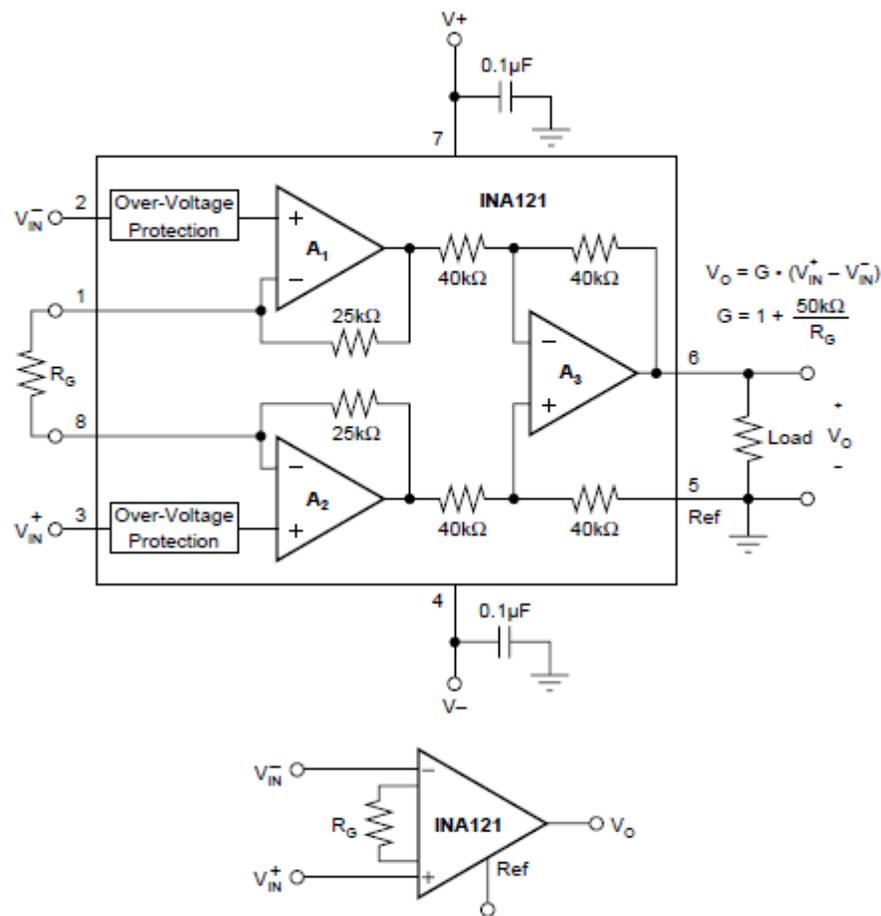


Figura 5.3. Conexiones básicas y representación simplificada del INA121.

El INA121 es uno de los amplificadores de instrumentación más utilizados por tener características de operación muy buenas, sin embargo este tipo de amplificador es del tipo de fuente bipolar, es decir, su funcionamiento está diseñado para trabajar con dos fuentes de alimentación. Teniendo en cuenta las características de diseño deseado, se optó por usar el circuito integrado LMC7660 que es un convertidor de voltaje tipo CMOS de capacitor conmutado, el cual es capaz de convertir un voltaje positivo de un rango entre +1.5V a +10V al correspondiente voltaje negativo de -1.5V a -10V, además de tener un bajo consumo de corriente y una alta eficiencia en la conversión del voltaje y la potencia.

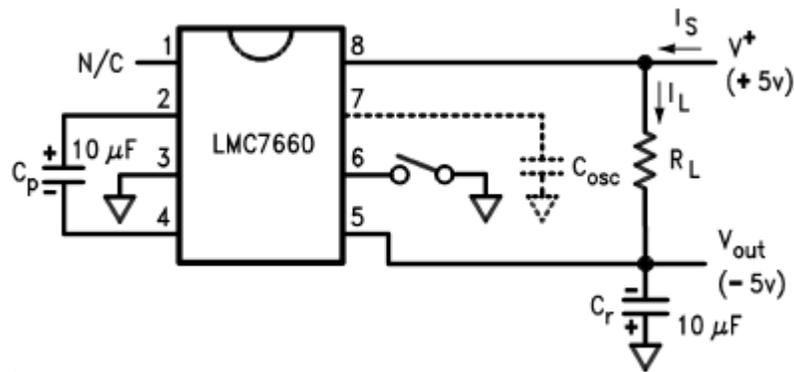


Figura 5.4. Circuito para obtener una fuente bipolar utilizando el integrado LMC7660.

El ajuste de la ganancia para el INA121 se realiza conectando un solo elemento resistivo externo, R_G , conectado entre las terminales 1 y 8, de donde el fabricante proporciona la ecuación para calcular la ganancia deseada de acuerdo al valor de R_G utilizado.

$$G = 1 + \frac{50\text{k}\Omega}{R_G} \quad (5.1)$$

Los valores de resistencias y ganancias comúnmente utilizados se muestran en la tabla 5.1 la cual es proporcionada por el fabricante.

Tabla 5.1. Valores de Ganancia y Resistencia para el INA121.

Ganancia deseada (G)	R_G (Ω)
1	No conectado
2	50 k
5	12.5 k
10	5.556 k
20	2.632 k
50	1.02 k
100	505.1
200	251.3
500	100.2
1000	50.05
2000	25.01
5000	10.00
10000	5.001

Para cumplir los requisitos de selectividad del prototipo detector se determinó alternar diferentes valores de ganancia en conjunto con el acoplamiento de altas impedancias a la entrada del circuito, utilizando el método de prueba y error para obtener la combinación que permitiera obtener una sensibilidad adecuada, tomando en consideración los niveles de voltaje y la distancia de seguridad mínima de operación del prototipo detector, de tal forma que se pudiera obtener un correcto funcionamiento a una distancia prudente de acuerdo al nivel de tensión en el equipo a verificar, la tabla 5.2 muestra las distancias de seguridad de acuerdo al nivel de tensión donde se verificará la presencia/ausencia de voltaje.

Tabla 5.2. Distancia de seguridad de acuerdo al nivel de tensión.

Nivel de Voltaje	Distancia
Baja tensión en 480 V	0.80 m
Media tensión en 4.160 kV	0.80 m
Alta tensión en 400 kV	3.60 m

5.5. ETAPA DE MANIPULACIÓN DE LA SEÑAL.

En la etapa de amplificación se acondicionó la señal de un nivel de voltaje a otro, dicho acondicionamiento se hizo en corriente alterna, por lo que se debe manipular dicha señal para poder manejarla de acuerdo a los requerimientos del prototipo detector. La etapa de manipulación de la señal está compuesta por el circuito rectificador de precisión de media onda y el circuito comparador, por lo que se determinó utilizar el circuito integrado con doble amplificador operacional de uso general y de entrada tipo JFET, TL082 de Texas Instruments, el cual tiene las siguientes características:

- Impedancia de entrada $\geq 10^{12} \Omega$.
- CMRR ≈ 100 dB.
- Corriente de polarización $\leq \pm 50$ pA.
- Fuente de alimentación de ± 18 V.
- Baja corriente de alimentación ≈ 3.5 mA

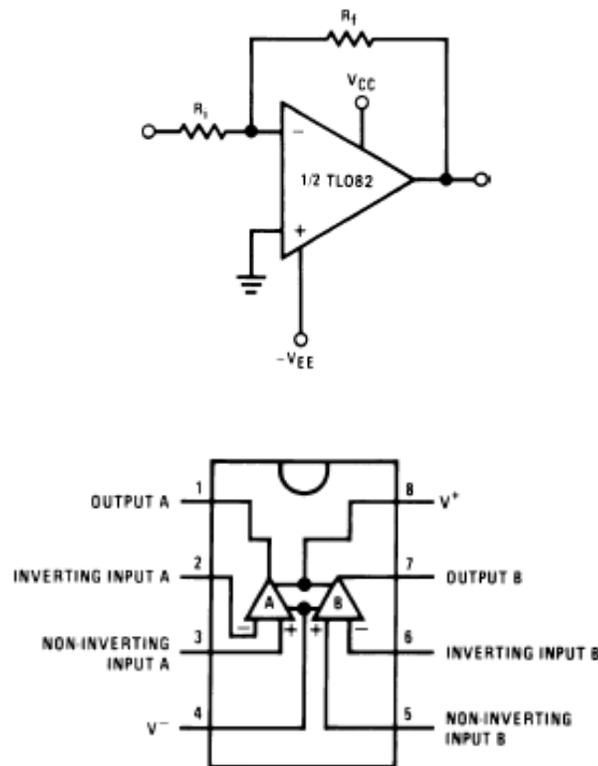


Figura 5.5. Conexión típica y diagrama de conexiones del TL082.

5.6. CIRCUITO RECTIFICADOR DE PRECISIÓN.

Para implementar el circuito rectificador de precisión de media onda se utilizó la combinación de un amplificador operacional en conjunto con un diodo rectificador, con el fin de obtener un circuito que se comporte como un diodo ideal, útil para procesamiento de alta precisión de la señal manipulada. Tomando en cuenta el funcionamiento del diodo ideal, el cual permite la circulación de la corriente eléctrica a través de un solo sentido; se tendrá que cuando la tensión de entrada del amplificador operacional es negativa, hay una tensión negativa en el diodo por lo que queda en polarización inversa, por lo tanto funciona como un circuito abierto, no fluye corriente a través de la carga, y el voltaje de salida es cero. Cuando la entrada es positiva, esta es amplificada por el amplificador operacional que polariza directamente y conmuta al diodo para que funcione como circuito cerrado, por lo que la

corriente fluye a través de la carga y, debido a la realimentación, la tensión de salida es igual a la tensión de entrada.

Para altas frecuencias y aplicaciones de alta velocidad, esta aplicación no es recomendable debido a que se pueden generar ciertos retrasos, cuando la entrada se convierte en (incluso ligeramente) negativa, el amplificador operacional opera en lazo abierto, y ya que no hay señal de realimentación a través del diodo el amplificador operacional entra en saturación, y si la entrada se convierte en positivo una vez más, el amplificador tiene que salir del estado de saturación antes de que la amplificación positiva y rectificación ocurra de nuevo, reduciendo en gran medida la respuesta de frecuencia del circuito; en este caso, debido a que la aplicación será para el rango de SLF (Super Low Frequency, por sus siglas en inglés, súper baja frecuencia) para la frecuencia industrial de 60 Hz, este inconveniente no afecta el correcto funcionamiento del prototipo detector.

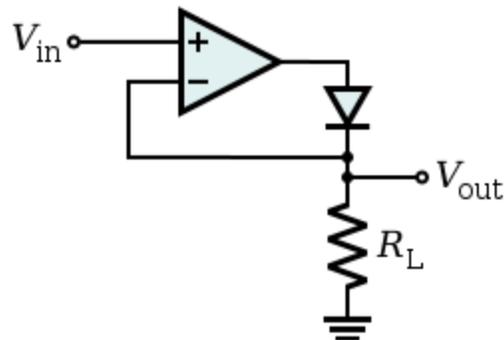


Figura 5.6. Configuración típica para un rectificador de precisión de media onda.

5.7. CIRCUITO COMPARADOR.

Para construir un comparador, en una entrada se conecta el voltaje variable (V_{in}) y la otra entrada se utiliza un voltaje de referencia (V_{ref}), el cual es un voltaje fijo y no cambia, para este propósito se determinó utilizar el circuito encapsulado regulador de voltaje lineal positivo de tres terminales, LM317 de National semiconductor; capaz de suministrar en condiciones normales hasta 1.5 A, en un rango que va desde 1.2 hasta los 37 Volts. Por sus

características solo requiere dos resistores externos para conseguir el voltaje de salida deseado, para esta aplicación el voltaje de salida se determinó en 4V contemplando su correcto funcionamiento debido a la alimentación proporcionada por una batería de 9 V. Por otro lado, es importante resaltar que su consumo de corriente es bajo, comparado con otros reguladores en circuito integrado y su línea de carga y regulación es mejor que en los reguladores fijos, además que dispone de protección por limitación de corriente y exceso de temperatura, siendo funcional la protección por sobrecarga, incluso si el terminal de regulación está desconectado.

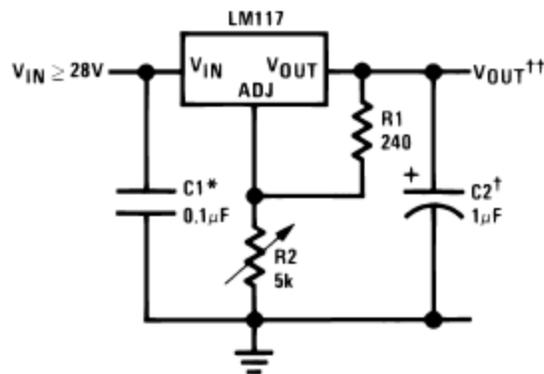


Figura 5.7. Conexión típica para un regulador ajustable de 1.2 a 25 V.

El voltaje de la salida del circuito comparador, dependerá del resultado de la comparación de ambos voltajes de entrada; siendo la salida el voltaje de saturación positiva $+V_{sat}$ cuando el voltaje variable (V_{ent}) sea mayor que el voltaje de referencia (V_{ref}) ó el voltaje de saturación negativa $-V_{sat}$ cuando el voltaje variable sea menor que el voltaje de referencia.

5.8. ETAPA DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN EN RADIOFRECUENCIA.

Los módulos transmisor-receptor son la base de la comunicación inalámbrica en el sistema de radiofrecuencia, a continuación se describirá a grandes rasgos cada uno de los dispositivos que conforman dicho sistema:

5.8.1. Módulo transmisor.

Para la implementación de este módulo se empleó el circuito integrado HT12E, el cual es un codificador (encoder) serial de datos para aplicaciones de control remoto. Este circuito es especialmente útil para ensamblar dispositivos transmisores de control remoto que usan canales de RF o medios infrarrojos como medio de transmisión. El circuito codifica 4 bits de datos y 8 bits de dirección en un flujo de datos que es transmitido en forma serial a través de un módulo de radio frecuencia o señales infrarrojas. La señal debe ser recibida con el decodificador correspondiente (HT12D).

El módulo de RF transmisor acepta una señal digital que se “montará” sobre una portadora de 433 MHz., cambiando la amplitud de la señal portadora según el valor lógico de la señal a transmitir (datos). Se podría considerar esto como una especie de código morse en el que la información binaria se transmite mediante la ausencia o presencia de señal portadora. El circuito HT12E genera un flujo de datos serial que contiene la información de estado de las 4 entradas digitales y la información de direccionamiento (ajustada mediante el DIP switch en el esquemático).

Sus características principales son:

- 1.- Voltaje de operación 2.4 a 12V
- 2.- Bajo consumo de corriente en Standby
- 3.- Capaz de codificar 12 bits de información
- 4.- Ajuste de dirección binaria
- 5.- Codifica 8 bits de dirección y 4 bits de datos
- 6.- Oscilador integrado que solo requiere un resistor de 5% de tolerancia
- 7.- Pin de salida de recepción válida

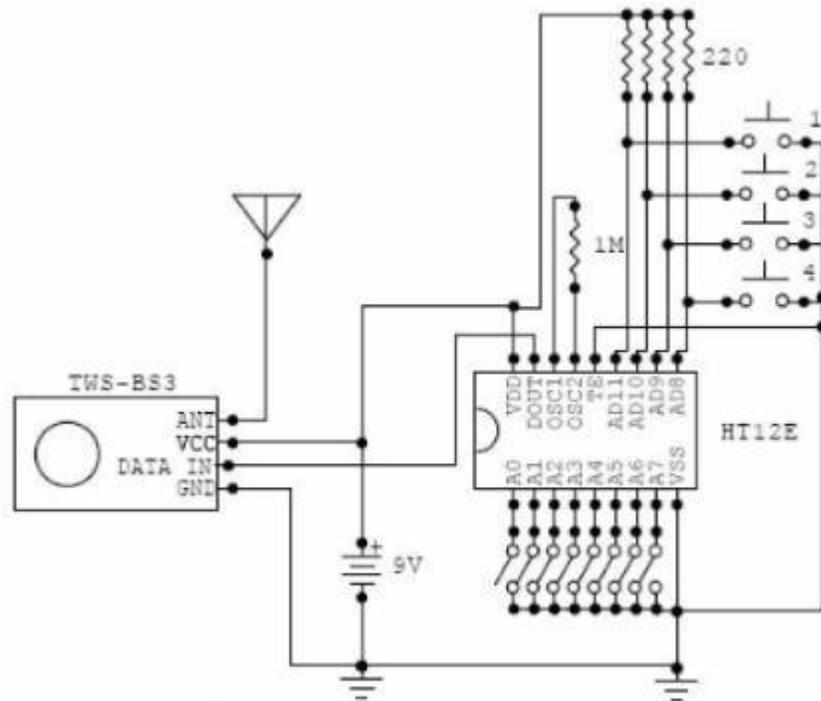


Figura 5.8. Esquema básico de un módulo transmisor en RF utilizando un codificador HT12E.

5.8.2 Módulo receptor.

Para la implementación de éste módulo se empleó el circuito integrado HT12D, el cual es un decodificador serial de datos para aplicaciones de control remoto. Este circuito es especialmente útil para ensamblar dispositivos receptores de control remoto que usan canales de RF o medios infrarrojos como medio de transmisión. El circuito convierte un flujo de datos serial en 4 bits de datos de salida. Durante el proceso de recepción se realiza una comparación de la dirección en el flujo de datos con la dirección seleccionada localmente antes de colocar los cuatro bits de salida en los pines correspondientes. Posee las mismas características que el HT12E.

El módulo receptor presentará en el pin de salida una señal digital muy similar a la que entró en el módulo transmisor. Es responsabilidad del circuito que recibe esta señal digital verificar la integridad de la transmisión y decidir qué se debe hacer. El circuito HT12D está

encargado de esta tarea. El circuito lee los datos seriales y cambia el estado de sus salidas según el patrón recibido.

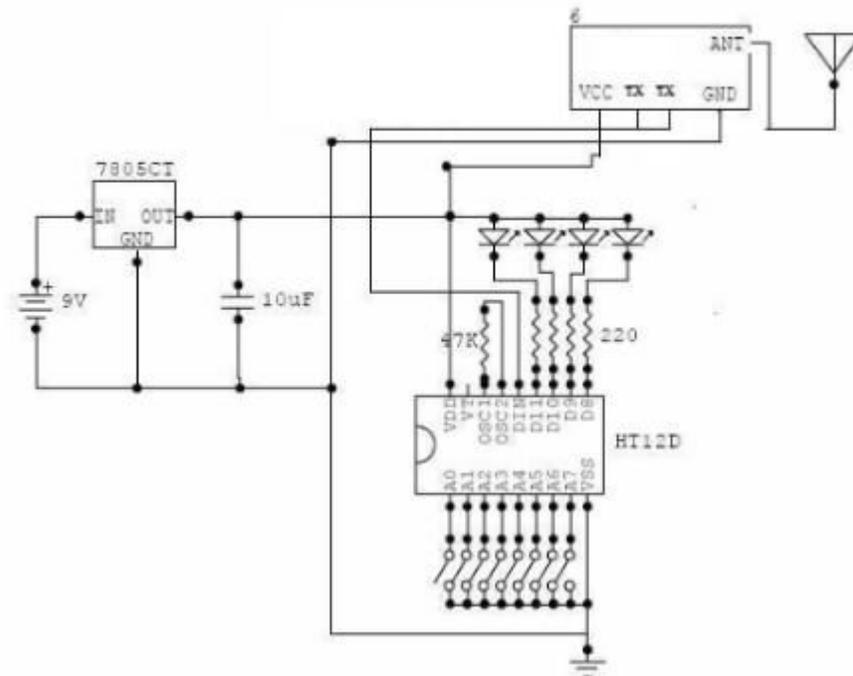


Figura 5.9. Esquema básico de un módulo receptor en RF utilizando un decodificador HT12D.

Este módulo de transmisor/receptor para RF es de bajo costo pero sumamente poderoso. Es completamente compatible con diferentes tecnologías como Arduino, AVR, PIC, etc.

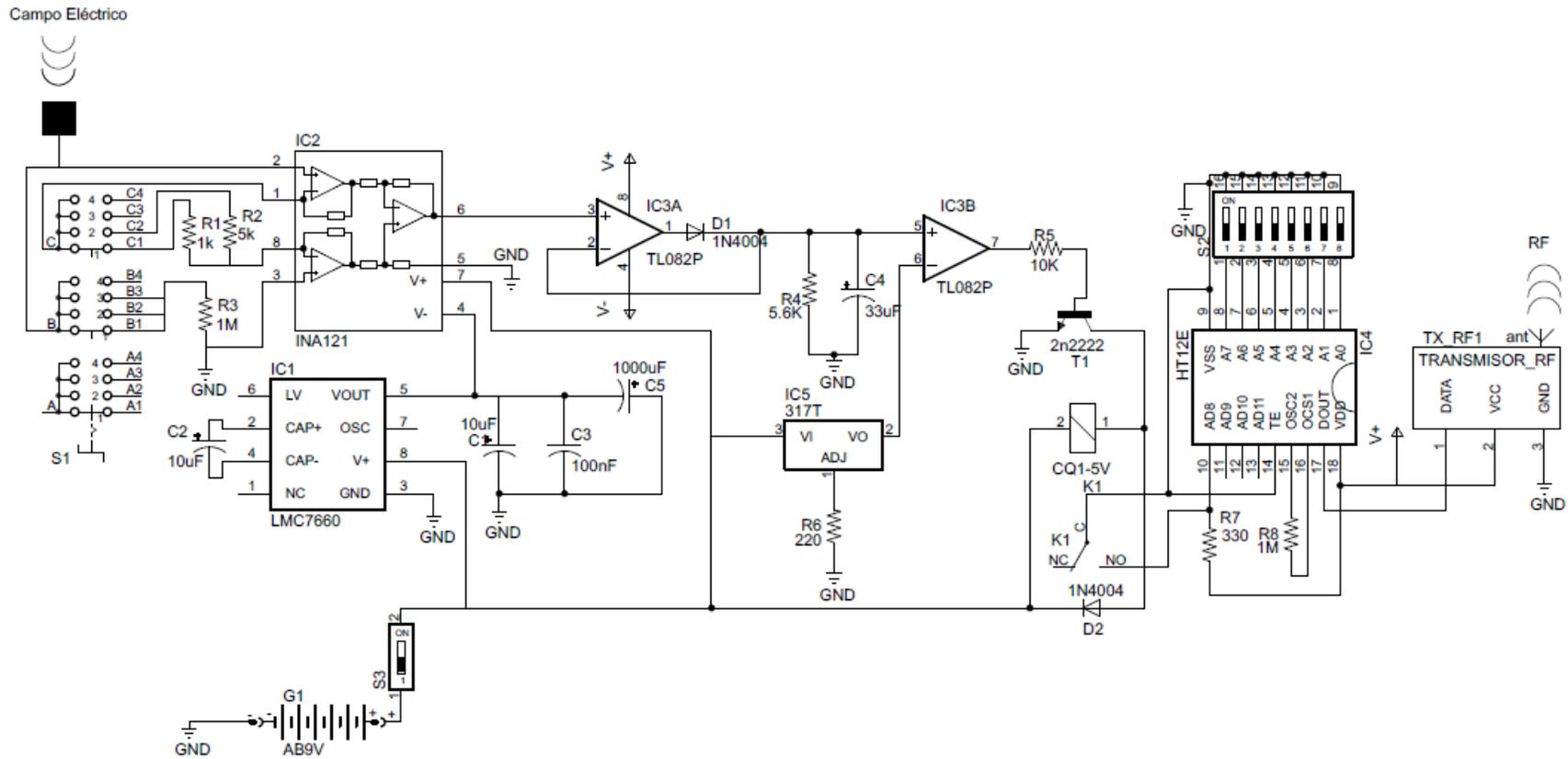


Figura 5.10. Diagrama general del prototipo detector de presencia/ausencia de voltaje para baja, media y alta tensión.

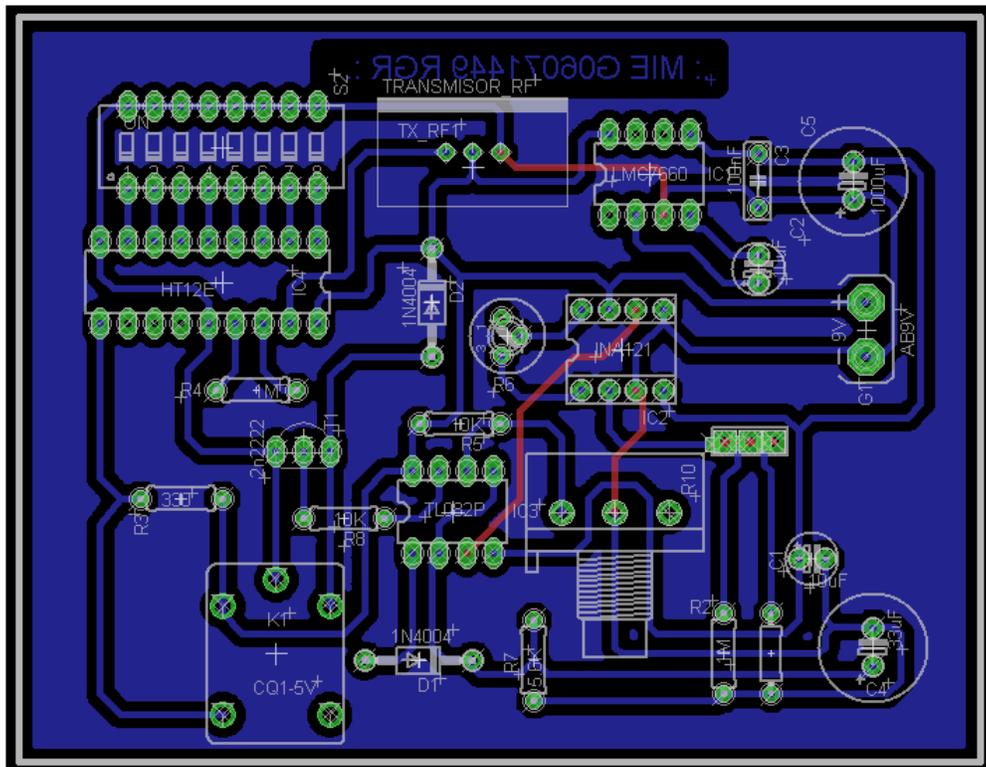


Figura 5.11. Esquema general de las pistas del prototipo detector vista inferior.

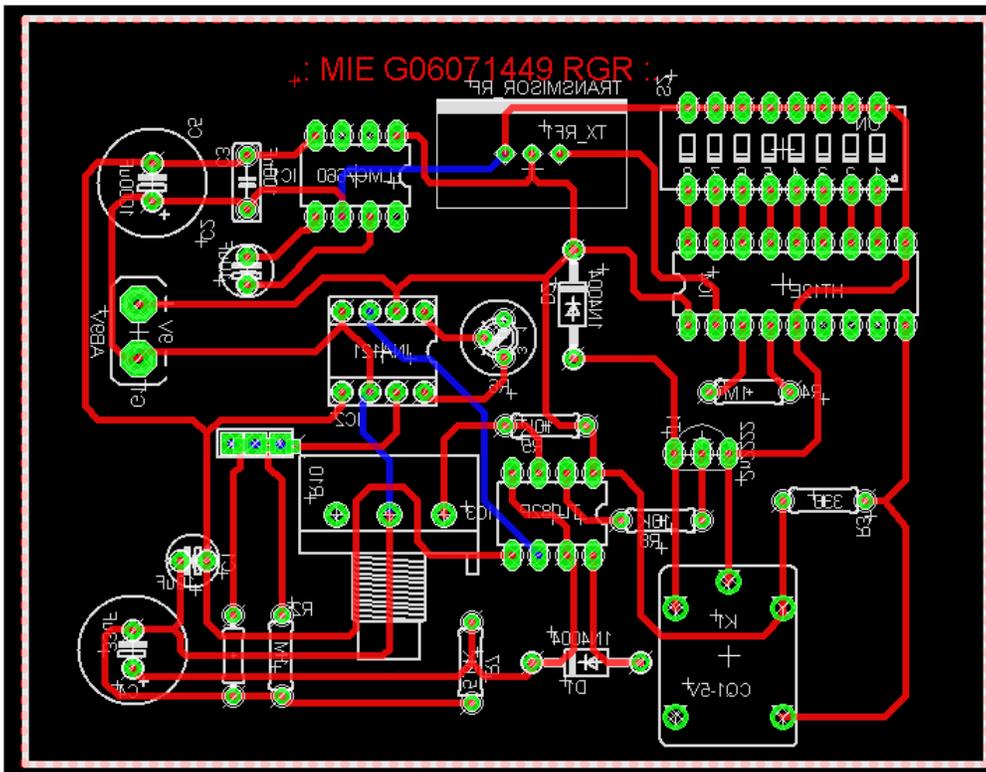


Figura 5.12. Esquema general de las pistas del prototipo detector vista superior.

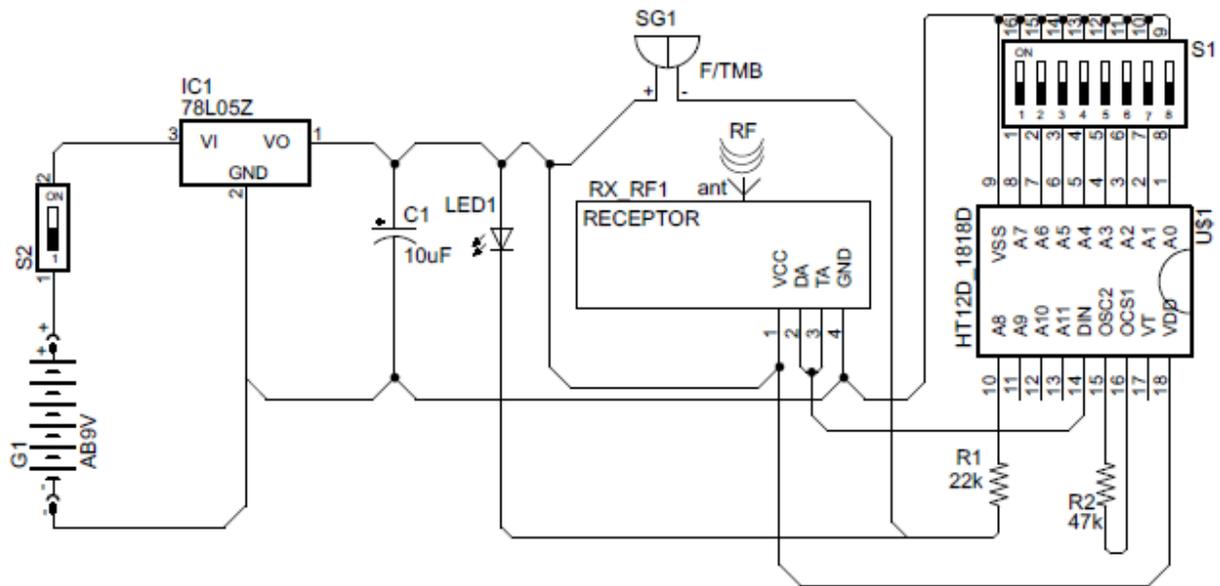


Figura 5.13. Diagrama general etapa de salida del prototipo detector.

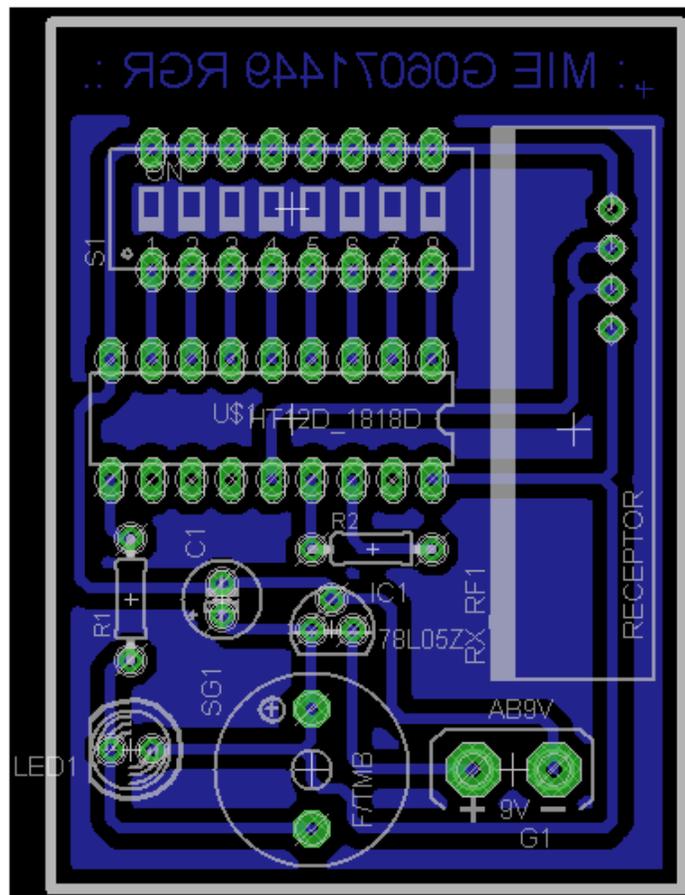


Figura 5.14. Esquema general de las pistas del circuito de salida vista inferior.

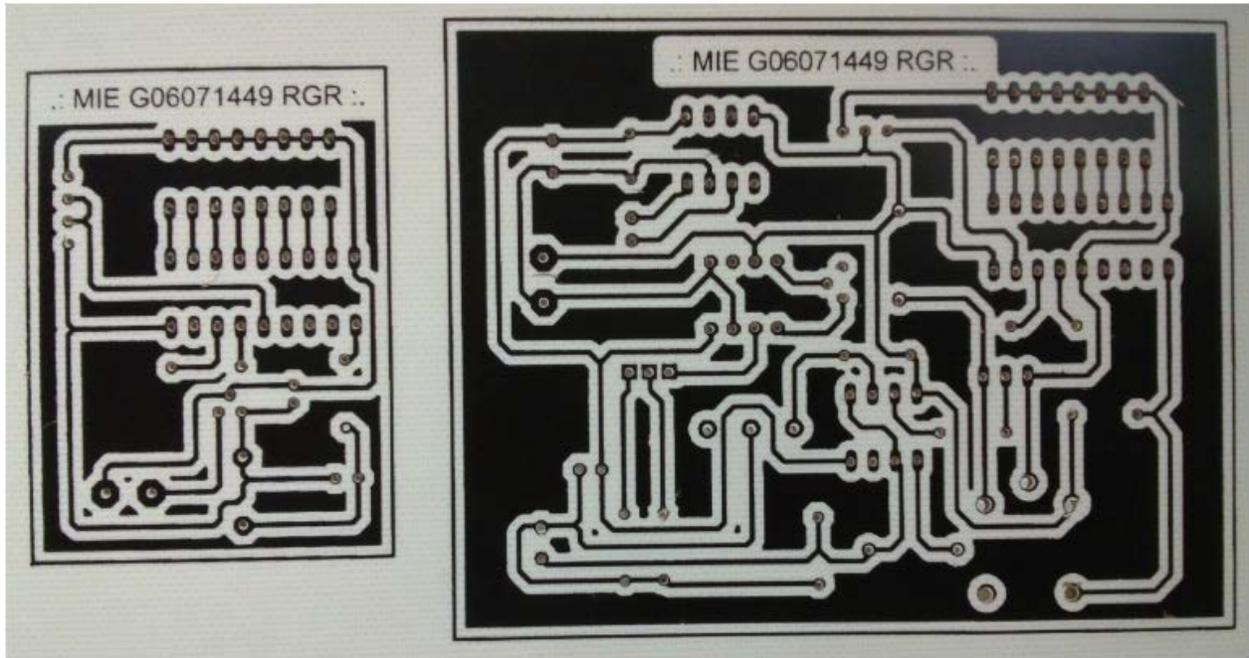


Figura 5.17. Primera etapa de aplicación de ácido y perforación del circuito.

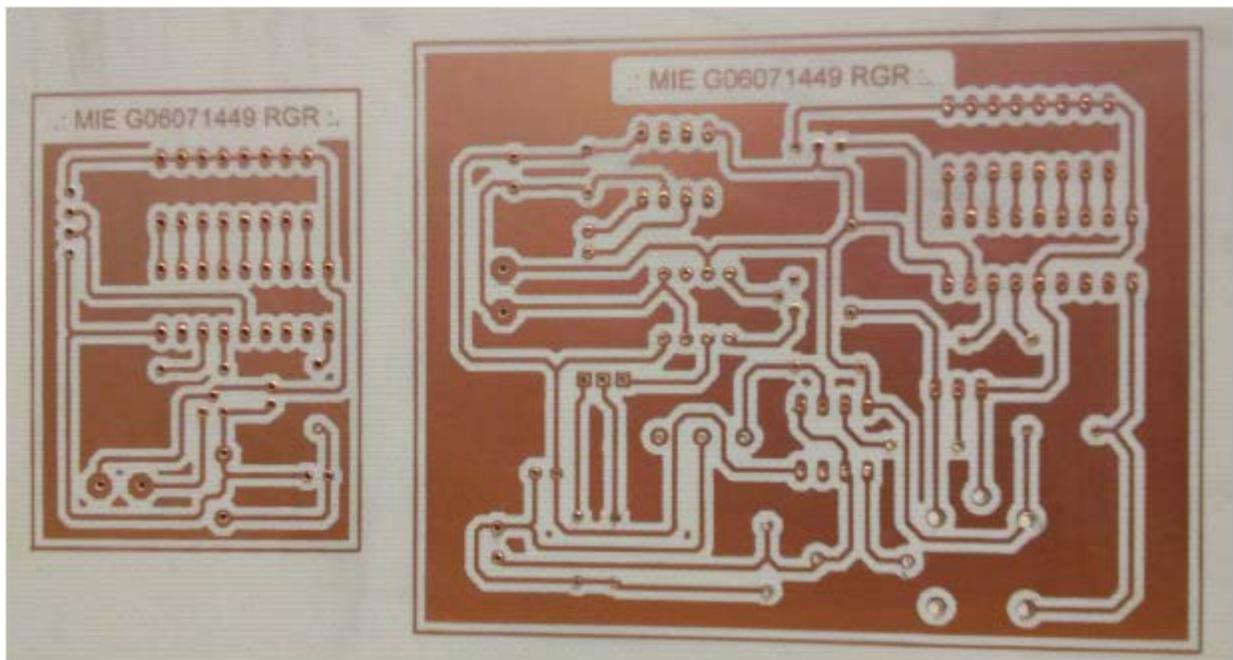


Figura 5.18. Circuito impreso listo para colocación y soldado de los componentes electrónicos.



Figura 5.19. Vista interior de etapa principal con componentes electrónicos soldados, montado sobre su gabinete plástico.



Figura 5.20. Vista interior de etapa de salida con componentes electrónicos soldados, montado sobre su gabinete plástico.

Capítulo

6

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos, considerando el protocolo de pruebas desarrollado y las pruebas de campo realizadas en baja, media y alta tensión, en la Central de Ciclo Combinado Altamira III y IV de Iberdrola Energía Altamira S.A. de C.V. como parte de la estancia de posgrado y en coordinación con el Jefe del departamento de mantenimiento eléctrico, el Ing. José Refugio Nieblas Sotomayor.

6.1. PROTOCOLO DE PRUEBAS.

Para la realización de las pruebas, se solicitó al Ing. José Refugio Nieblas Sotomayor, Jefe de mantenimiento del departamento eléctrico de la central de ciclo combinado (C.C.C.) Altamira III y IV, el acceso a diferentes instalaciones con diferentes niveles de voltaje para tener a fin realizar ajustes y calibración del prototipo desarrollado, tomando en consideración en todo momento las medidas de seguridad requeridas así como la distancia de seguridad mínima de acuerdo al nivel de voltaje +0.50m para extremar precauciones; para lo cual el primer objetivo fue preparar un protocolo de pruebas, para cuyo diseño se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Solicitar instalaciones en 480 V, 4.16 kV y 400 kV de manera que sea posible verificar el funcionamiento del equipo en diferentes niveles de tensión, en partes que se encuentren energizadas y desenergizadas.
- Verificar que el equipo se active siempre que se acerque a un equipo energizado.
- Verificar que el equipo no se active cuando se acerque a un equipo desenergizado.
- Verificar la distancia de invasión a la zona energizada para que el equipo detecte presencia de tensión.
- Verificar la distancia mínima de seguridad para el operador para evitar cualquier tipo de accidente.
- Verificar la selectividad del dispositivo para los diferentes rangos de operación.

La verificación de la presencia/ausencia de tensión debe realizarse en el lugar donde se han abierto las fuentes de alimentación y donde se van a realizar los trabajos; en cualquier caso hay que actuar como si la instalación estuviera energizada y no debe ser tocada ni aproximarse peligrosamente a ella hasta que se haya verificado la presencia/ausencia de tensión y se haya puesto a tierra y en cortocircuito todos los conductores concernientes a la instalación, por ello se han de tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Usar el equipo de protección personal adecuado: para la realización de estos trabajos, el operador deberá ir protegido con lentes de seguridad, guantes de alta tensión, casco

dieléctrico, botas con casquillo dieléctrico y prendas ignífugas o en su caso de algodón.

- Mantener las distancias de seguridad: Se entiende por distancia de seguridad la que debe existir entre el punto más próximo del equipo energizado y cualquier punto del operador.
- Por ningún motivo se asumirá que una instalación está desenergizada, mediante percepciones individuales de ausencia de ruido audible o efecto visual por efecto corona, eliminación de radio interferencia en receptores de radio, efecto de campo eléctrico sobre la piel, o cualquier otra percepción que no sea verificable por medidas físicas y equipos adecuados.

6.2. PRUEBAS DE CAMPO REALIZADAS.

Para la realización de las pruebas, por motivos de las condiciones operativas se consideró hacerlas conforme fueran surgiendo actividades de mantenimiento preventivo en equipos correspondientes a los niveles de tensión requeridos, apoyando en primera instancia en dichos mantenimientos al personal del departamento eléctrico de la C.C.C. Altamira III y IV. Previamente en instalaciones del ITCM se realizaron pruebas en 13.8 kV y en 127V, respectivamente.

6.2.1 Pruebas en alta tensión

Se procedió a reunirse en la subestación de 400kV y debido a que la central se encuentra constantemente produciendo energía eléctrica, todos los equipos de la subestación estaban energizados, por lo que se procedió a comprobar la selectividad del dispositivo, lo cual representaba un obstáculo por la gran radiación que se genera debido al nivel de voltaje ahí manejado. La estructura de soporte de los equipos tiene una altura aproximada de 3 metros, lo ideal era hacer las pruebas a esta altura, donde empieza el aislamiento de los equipos, pero por consideraciones de extremar seguridad, se sugirió por parte de personal de planta realizarlas a 2.5 metros, considerando esta altura como posición 1 estando parado frente al equipo a probar, y la posición 2 a 1.5 metros sobre el nivel del suelo. Los resultados se muestran en la tabla 6.1:

Tabla 6.1. Pruebas realizadas para detección de alta tensión en SE Altamira III y IV a 400 kV.

Prueba	Equipo	Posición 1	Posición 2	Observaciones
1	ATC A8622 A	Detecta	No detecta	Equipo energizado
2	ATC A8622 B	Detecta	No detecta	Equipo energizado
3	ATC A8622 C	Detecta	No detecta	Equipo energizado
4	Punto medio entre fases A y B	No detecta	No detecta	Equipo energizado
5	Punto medio entre fases B y C	No detecta	No detecta	Equipo energizado

Nota: En las pruebas 4 y 5, se llegaron a dar pulsos al momento de acercar el dispositivo a la zona de prueba, posteriormente quedó en estado normal, esto posiblemente debido a la interacción de los campos eléctricos de ambas fases.

**Figura 6.1.** Bahía 400 kV SE Altamira III y IV.

Posteriormente, debido a una alarma por bajo nivel de gas SF₆ (Hexafluoruro de azufre) en el interruptor ATC A1030 fase A y después de realizar las actividades correspondientes, se procedió a verificar la selectividad del dispositivo detector de voltaje, donde se pudieron obtener los siguientes resultados, mostrados en las figuras 6.2 a 6.4, teniendo el interruptor y las cuchillas correspondientes abiertas:

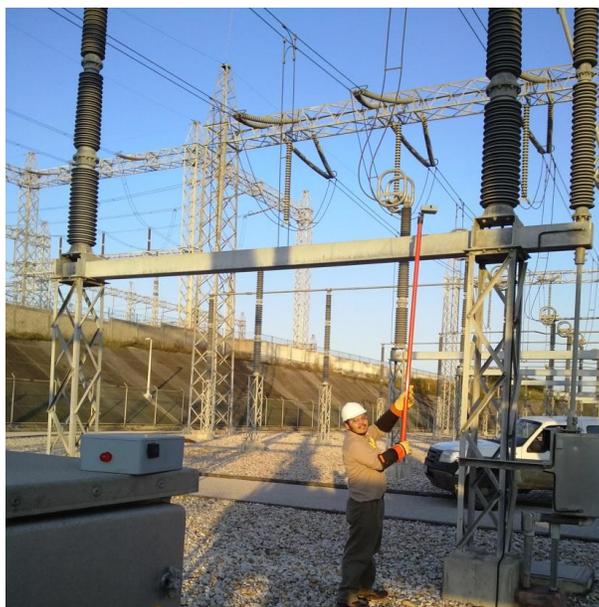


Figura 6.2. Prueba del dispositivo detector, comprobando la oportuna detección de voltaje, S. E. 400 kV Altamira III y IV, cuchilla A3511 fase C.

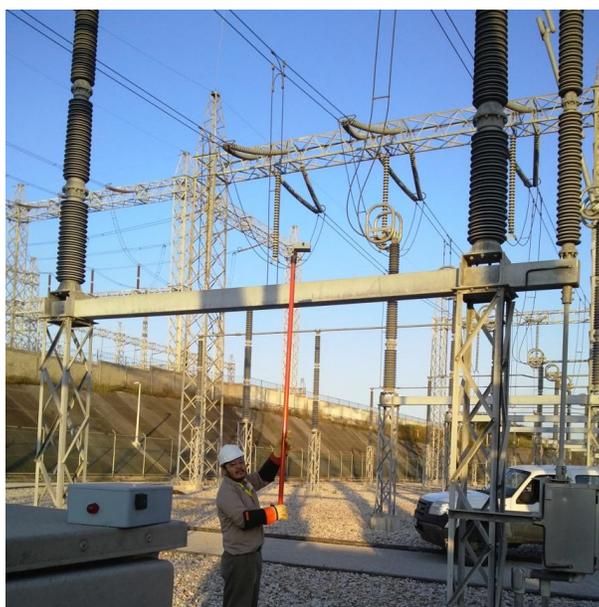


Figura 6.3. Prueba del dispositivo detector a 2 m. de la base de la cuchilla, donde se puede comprobar la selectividad del dispositivo en el rango de alta tensión al no detectar voltaje, S. E. 400 kV Altamira III y IV, cuchillas A3511 fase C.

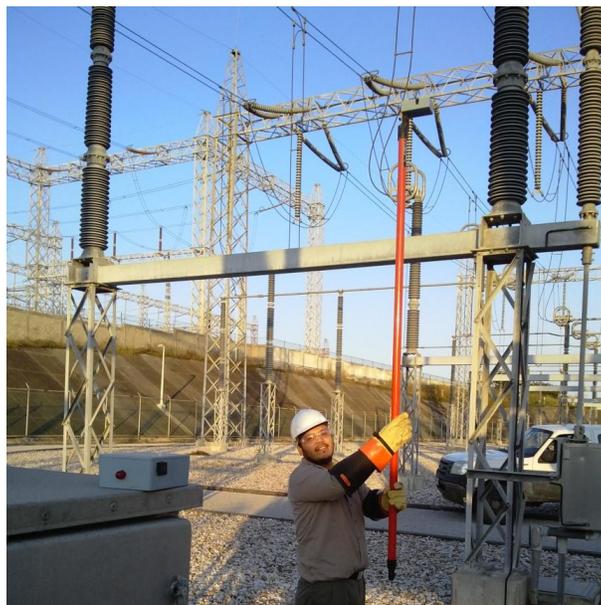


Figura 6.4. Prueba del dispositivo detector entre las fases B y C de las cuchillas ATC A3511 donde se puede comprobar la selectividad del dispositivo en el rango de alta tensión al no detectar voltaje, S. E. 400 kV Altamira III y IV.

6.2.2 Pruebas en media tensión

Se procedió a reunirse en la S.E. Módulo Matemático 2 donde se le dio mantenimiento preventivo al interruptor seccionador tripolar para tablero blindado de 4.16kV, del motor de agua de enfriamiento circuito cerrado 241-P-0100AM, en el cual se pudieron obtener los siguientes resultados, mostrados en las figuras 6.5 a 6.8:



Figura 6.5. Prueba del dispositivo detector en el lado de contactos hacia el equipo 241-P-0100AM, el cual estaba fuera de servicio y se verificó correctamente la ausencia de tensión de la fase B en 4.16kV.

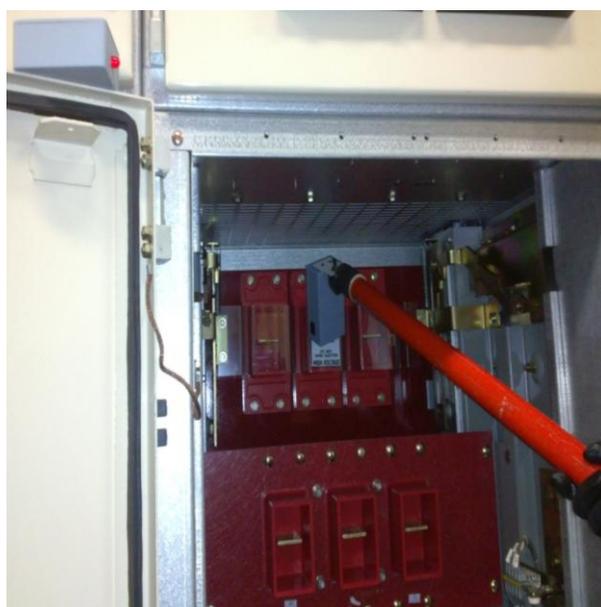


Figura 6.6. Prueba del dispositivo detector en el lado bus del tablero, el cual estaba energizado y se verificó correctamente la presencia de tensión en la fase B en 4.16kV.

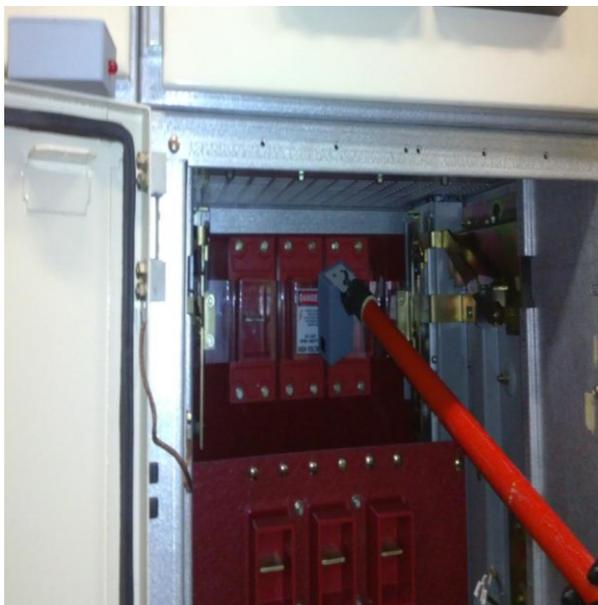


Figura 6.7. Prueba del dispositivo detector en el lado bus entre las fases B y C, demostrando la selectividad del dispositivo para detectar oportunamente la presencia/ausencia de voltaje específicamente sobre la fase de interés.

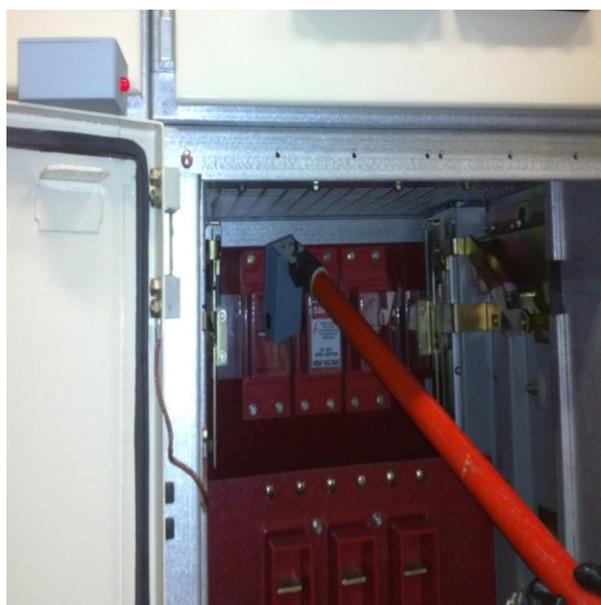


Figura 6.8. Prueba del dispositivo detector en el lado bus del tablero, el cual estaba energizado y se verificó correctamente la presencia de tensión en la fase A en 4.16kV.

En las instalaciones del ITCM área de posgrado, se procedió a reunirse junto con el asesor del proyecto, el M. C. Aarón González Rodríguez, en el área de la acometida de interconexión con la CFE, donde también está el transformador de distribución de 13.8 kV / 240-127V, en donde se consideraron los siguientes puntos para realizar las pruebas, la posición 1, a medio metros de distancia de las instalaciones y la posición 2, a 2 metros de distancia aproximadamente a partir de la base del poste. Los resultados se muestran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2. Pruebas realizadas para la detección de media tensión a 13.8 kV.

Prueba	Equipo	Posición 1	Posición 2	Observaciones
1	Lado primario transformador de distribución 13.8kV / 240-127V	No detecta	No detecta	Equipo energizado, Cable blindado.
2	Cuchillas en acometida de CFE	Detecta	No detecta	Equipo energizado

Se procedió a realizar pruebas en el lado primario del transformador, haciendo la observación que el equipo no detectó efectivamente, debido a que el cable de potencia está blindado, lo cual no permitió hacer una detección debido a que por las características del cable, no permite la dispersión de la radiación en el campo cercano a dicha instalación. Por otro lado en el área de las cuchillas, se hizo una detección efectiva considerando una distancia mínima de seguridad de acuerdo al nivel de tensión.

6.2.3 Pruebas en baja tensión.

Se procedió a reunirse en la S.E. Edificio administrativo donde se le dio mantenimiento preventivo al interruptor seccionador tripolar para tablero blindado de 480 V, del motor bomba de vacío condensador de superficie 206-P-0100AM, en el cual se pudieron obtener los siguientes resultados, mostrados en las figuras 6.9 a 6.11:

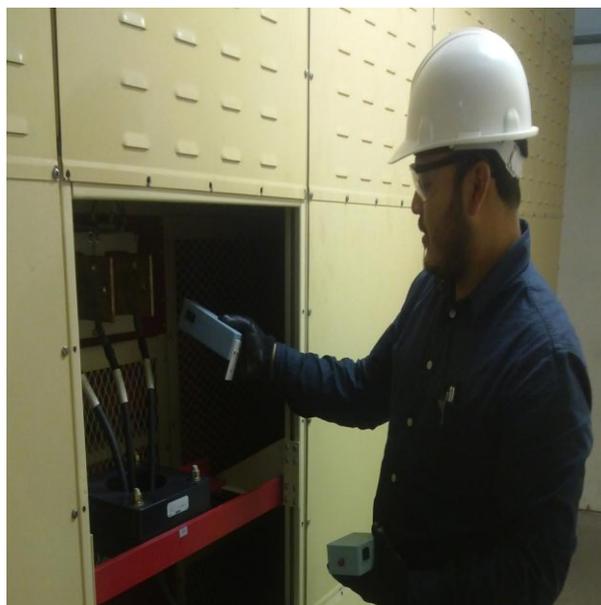


Figura 6.9. Prueba del dispositivo detector en el lado de contactos hacia el equipo 206-P-0100AM, el cual estaba fuera de servicio y se verificó correctamente la ausencia de tensión de la fase C en 480 V.

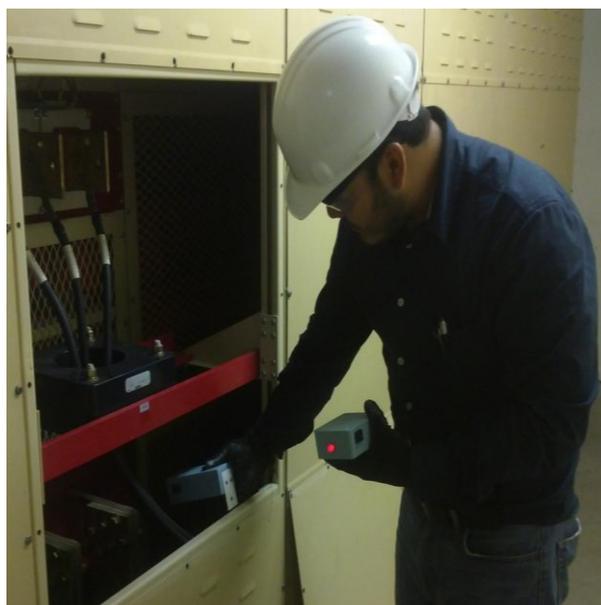


Figura 6.10. Prueba del dispositivo detector en el lado bus del tablero, el cual estaba energizado y se verificó correctamente la presencia de tensión de la fase C en 480 V.

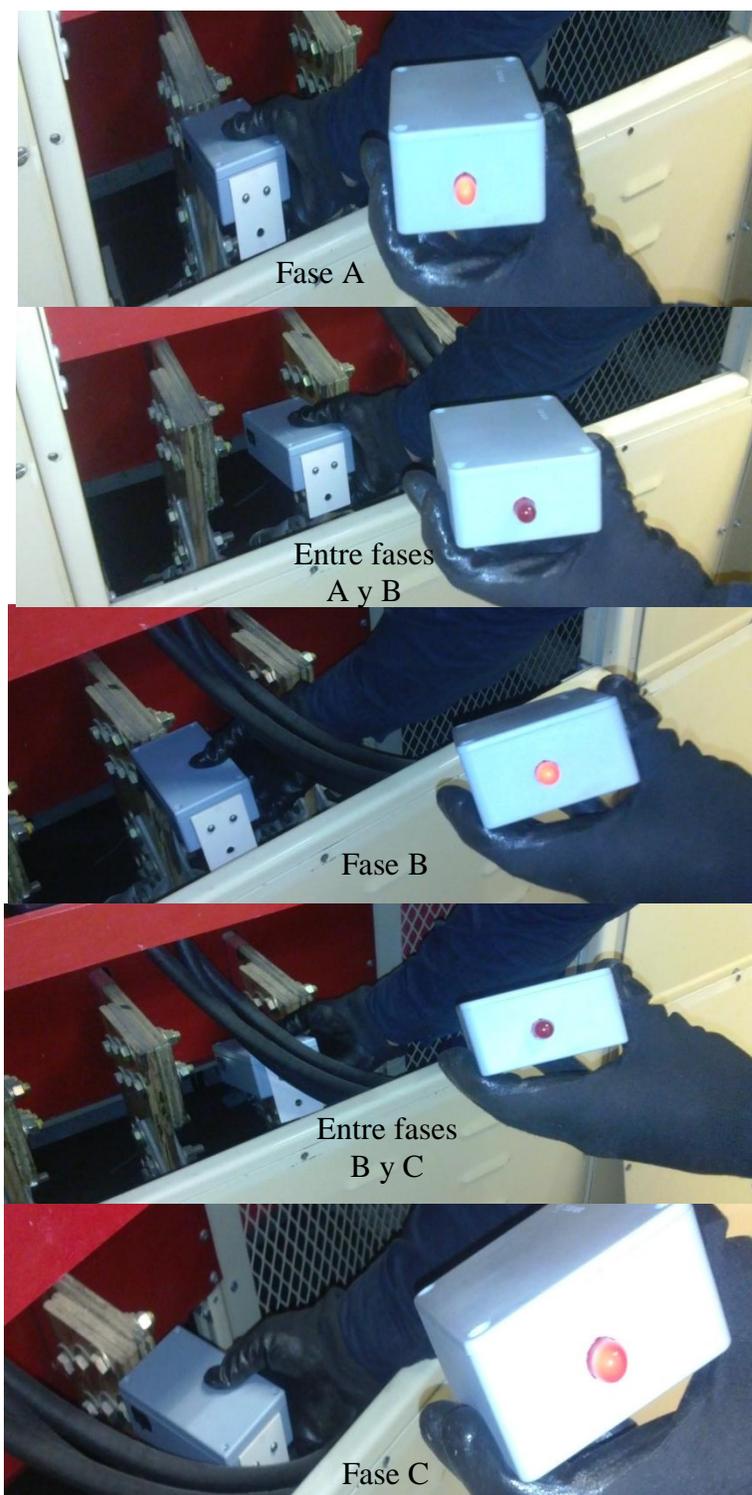


Figura 6.11. Secuencia de imágenes, donde se utiliza el rango de media tensión para disminuir la sensibilidad del dispositivo, comprobando oportunamente la presencia de voltaje en las fases A, B y C, y no detectando voltajes al medir entre las fases A y B, y B y C respectivamente.

Capítulo

7

Conclusiones y Recomendaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas y se mencionan algunas recomendaciones en la implementación del prototipo detector de presencia/ausencia de voltaje para baja, media y alta tensión.

7.1. CONCLUSIONES

Como parte de la implementación de este proyecto, mediante el diseño y construcción del prototipo detector de presencia/ausencia de voltaje para baja, media y alta tensión, y mediante la realización de pruebas de campo en instalaciones eléctricas a diferentes niveles de voltajes, se pudo comprobar la selectividad del dispositivo y su correcto funcionamiento, haciendo notar su eficiencia en condiciones de ruido e iluminación elevadas, gracias a que el módulo de alarma auditiva y visual está en la cercanía del operador e independiente del módulo detector, el cual deberá estar montado sobre una pértiga aislante para aproximarlo al equipo o instalación a verificar en media y alta tensión; logrando que el cumplimiento de las 5 reglas de oro, se logre de una manera más eficiente y segura.

Por otro lado el realizar las estancias de posgrado en una empresa como la Central de Ciclo Combinado (C. C. C.) Iberdrola Altamira III y IV fue una gran experiencia debido al contacto directo con el sector industrial, además de tener la facilidad para hacer las pruebas y ajustes necesarios para el correcto funcionamiento del prototipo, teniendo acceso a instalaciones en 480 V, 4160 V y 400 kV, lo que contribuyó de manera notable en el desarrollo de este proyecto.

7.2. RECOMENDACIONES

Como hemos podido observar, la detección oportuna de la presencia/ausencia de voltaje al trabajar en instalaciones eléctricas industriales es un requisito indispensable a la hora de trabajar en equipo desenergizado, siendo una parte fundamental de las 5 reglas de oro para este tipo de trabajos; lamentablemente en muchas ocasiones no se toman en cuenta las medidas necesarias por parte de los mismos trabajadores, quienes basados según ellos, en su experiencia, muchas veces no se cumplen al cien por ciento las medidas de seguridad. Estas malas costumbres hacen que se creen malas rutinas, hasta que ocurre lo inevitable, un accidente eléctrico, que puede repercutir, en alguna incapacidad temporal o alguna amputación y en el peor de los casos, la muerte. Es por ello que como base de este trabajo, por las experiencias vividas en las estancias de posgrado en la C. C. C. Iberdrola Altamira III y IV, se observó la necesidad de la modificación de la técnica en cómo se implementan las 5 reglas de oro.

. Irónicamente a lo largo de la historia el hombre ha sobrevalorado los bienes materiales, si bien se han definido y considerado de manera notable las medidas de seguridad e higiene, aun así se siguen presentando accidentes eléctricos al realizar trabajos en instalaciones eléctricas industriales; es por ello que partiendo del principio de protección principal o primaria y de respaldo, donde los equipos destinados a generar, transmitir o distribuir la energía eléctrica, se sobreprotegen contra fallas y dichas protecciones son diferenciadas con las siguientes características:

Protección primaria: Son aquellas que tienen la responsabilidad de despejar la falla en primera instancia, definidas para desconectar el mínimo número de elementos para desconectar la falla.

Protección de respaldo: Son aquellas que tienen la responsabilidad de despejar la falla en segunda instancia, es decir, solamente deben operar en el caso de que haya fallado la protección principal correspondiente, por lo que es muy importante independizar principios de operación, circuitos de alimentación, control etc., en uno y otro tipo de protección, de tal forma que lo que afecte la protección principal no afecte la protección de respaldo y viceversa.

Técnicamente se aconsejaría cubrir con equipos de respaldo el posible fallo de los equipos de protección primaria de todos los equipos principales en una subestación, sin embargo, consideraciones de tipo económicas han limitado su uso en casos donde la experiencia muestra que la probabilidad de producirse una falla es mínima; por el contrario en casos como el de protección de líneas aéreas son los equipos que soportan estadísticamente alrededor del 90% de las fallas que ocurren en un sistema eléctrico, siendo esta parte del sistema donde ocurren también la mayoría de los accidentes del personal que realiza maniobras de mantenimiento en dichas instalaciones, por lo que la implementación de un sistema de protección, basado en el principio de funcionamiento de este proyecto y enfocado a proteger al personal, se propone considerando las correspondientes modificaciones y adecuaciones para la verificación de la presencia/ausencia de voltaje, lo que representaría reducciones al mínimo de los accidentes eléctricos, logrando así sobreproteger al personal en caso de que no se cumplan las medidas de seguridad requeridas.

Debido a las características actuales de este proyecto, sería necesario hacer las modificaciones correspondientes para instalarlo permanentemente en la cercanía de los postes de las líneas de transporte de energía eléctrica, complementándose con un gabinete de control y verificación; se tendría verificación e indicación específica de cada fase de las líneas, donde normalmente van dos circuitos trifásicos, por lo que se permitiría la oportuna detección de la presencia/ausencia de voltaje de cualquier de sus líneas, y en caso de que estuviera energizada, se podría realizar una maniobra de apertura sobre los interruptores correspondientes; todo esto considerando previamente los ajustes del dispositivo de acuerdo al nivel de voltaje de las instalaciones y la distancia de donde se ubicará hasta el punto más cercano posiblemente energizado a verificar, así como utilizar celdas solares, para el sistema de alimentación del dispositivo.

Referencias

- [1] Análisis de varios accidentes eléctricos / Cesar Vicente Bohórquez Sánchez
- [2] Resumen de los campos eléctricos y magnéticos generados por las instalaciones eléctricas / Red eléctrica España.
- [3] Comisión Federal de Electricidad. CFE y la electricidad en México.
Disponible en:
http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/CFE_y_la_electricidad_en_Mexico/Paginas/Transmision.aspx
- [4] Transmisión de la energía eléctrica. Disponible en:
https://es.wikipedia.org/wiki/Transmisi%C3%B3n_de_energ%C3%ADa_el%C3%A9ctrica
- [5] Griffiths, David J. (1999). Introduction to Electrodynamics. Prentice-Hall Inc.
- [6] Landau, Lev. (1980). The Classical Theory of Fields. Butterworth-Heinemann.
- [7] Antenas. A. Cardama, L. Jofre, J.M. Rius, J. Romeu, S. Blanch, M. Ferrando. Edicions UPC ISBN 84-8301-625-7
- [8] Compatibilidad electromagnética, Joan Pere López Veraguas, Marcombo.
- [9] Estudio de campos magnéticos y eléctricos en las líneas de transmisión mediante un programa de simulación por computadora, Nelson Robelo Mojica.
- [10] Campo eléctrico de líneas de transmisión de extra alta tensión y el medio ambiente, R. Arturo Gajardo V.
- [11] Cálculo del campo eléctrico bajo líneas de transmisión, Johana Catalina Restrepo Domínguez y Diego Fernando Garzón Valencia.

- [12] Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales, Robert F. Coughlin 5ta. Edición.
- [13] Diseño con amplificadores operacionales y circuitos integrados analógicos, Sergio Franco 3era. Edición. McGraw-Hill
- [14] Amplificadores operacionales y filtros activos, Antonio Pertence Junior, McGraw-Hill
- [15] Módulos de RF para radiocontrol, Daniel J. Bolaños

Apéndice

A

Manual de operación

ADVERTENCIA.

El prototipo detector de voltaje para baja, media y alta tensión ha sido diseñado teniendo en mente la seguridad, sin embargo, ningún diseño puede dar protección total frente a un mal uso. Si no se tiene cuidado o no se siguen las normas de seguridad, los circuitos eléctricos pueden ser peligrosos y letales. Este dispositivo solo debe ser usado por personal autorizado y debidamente entrenado, que entienda bien los procedimientos de prueba de altas tensiones. Siempre verifique que el prototipo detector funcione correctamente antes y después de la prueba. Verifique la posición del selector de rango antes de realizar la prueba de presencia/ausencia de voltaje.

DESCRIPCIÓN.

El prototipo es un detector de voltaje por proximidad, no está diseñado para entrar en contacto con conductores o equipo energizado. Debe ser usado junto con una pértiga aislada adecuada al voltaje de trabajo. El prototipo detector no es un “instrumento de medición” propiamente tal, sino mas bien es un dispositivo diseñado para advertir al usuario sobre la presencia/ausencia de voltaje en el lugar de trabajo. El prototipo detecta el campo eléctrico irradiado (V/m) por un conductor energizado. El campo eléctrico irradiado aumenta con el voltaje de línea pero disminuye con la distancia y/o aislación. Cuando se detecta un campo eléctrico, se dispara una señal sonora y un indicador visual que advierten al usuario. El prototipo detector tiene tres rangos de voltaje, estos corresponden a ajustes internos de la sensibilidad al campo: a menor rango de voltaje mayor sensibilidad y mayor

alcance para detectar el campo eléctrico. También tiene un modo de “prueba” para comprobar la correcta comunicación y funcionamiento entre el módulo detector y el módulo de salida.

NOTA IMPORTANTE.

El prototipo detecta campos irradiados, para que esto se logre, la muestra o un cable energizado deben irradiar un campo eléctrico. Cables blindados no irradian o irradian campos eléctricos muy débiles. El prototipo detector puede no detectar, como se espera, el campo eléctrico en cables blindados (los cables enterrados normalmente son blindados) ya que este dispositivo tiene una sensibilidad menor frente a este tipo de cables. No se recomienda el uso del mismo en cables con blindaje, en su caso utilice el ajuste más bajo (baja tensión - mayor sensibilidad).

NIVELES DE DETECCIÓN.

El prototipo detector se utiliza acercándolo al conductor vivo hasta que se activa la luz de advertencia y el zumbador. Los valores mostrados en la tabla A.1, dan una orientación de las distancias a las cuales el prototipo detectará un voltaje determinado. Tome nota que estas pruebas se hicieron en condiciones de trabajo a valores de voltaje específicos, para los respectivos rangos de operación de baja, media y alta tensión, por lo que para mediciones en otros niveles de voltaje puede haber variaciones en los resultados finales. Las distancias deben tomarse como referencia y no como una especificación.

Tabla A.1 Distancias típicas de detección de acuerdo al rango de voltaje.

Rango	Voltaje	Distancia
Baja tensión	127 V	2.5 cm.
Baja tensión	480 V	15 cm.
Media tensión	4.160 kV	20 cm.
Media tensión	13.8 kV	50 cm.
Alta tensión	400 kV	430 cm

MODO DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO.



Figura A.1 Vista frontal, módulo detector y módulo receptor que conforman el prototipo detector.

El dispositivo está conformado por dos módulos separados, que en conjunto conforman el prototipo detector, motivo por el cual se debe verificar el correcto funcionamiento del mismo, considerando, tanto la alimentación de ambos módulos, la comunicación por radiofrecuencia de los mismos y la verificación de las salidas visual y auditiva, por lo que antes de verificar la presencia/ausencia de voltaje en un equipo o conductor, se deberán seguir los siguientes pasos:

1. Primeramente, se deberá encender el módulo receptor, y el módulo detector deberá estar apagado; este modo activará la señal auditiva y visual, comprobando su correcto funcionamiento, en cuanto a alimentación y a las señales de salida activas para el módulo receptor.



Figura A.2 Verificación de funcionamiento del modulo receptor.

2. Posteriormente, con el módulo receptor ya encendido y verificado su funcionamiento, ahora encenderemos el módulo detector, inmediatamente después la señal auditiva y visual se desactivará, lo que comprobará la correcta comunicación en radiofrecuencia y la alimentación del módulo detector.



Figura A.3 Prototipo detector listo para detección de voltaje.

3. El dispositivo estará listo para verificar voltajes de acuerdo al rango de tensión seleccionado. Es recomendable comenzar con un rango menor al voltaje de trabajo real, luego probar con rangos mayores.



Figura A.4 Vista lateral, selector rotatorio para definir el rango de operación en el modulo detector, BT para baja tensión, MT para media tensión y AT para alta tensión.

En caso de falla de alimentación, se deberá cambiar la batería, el prototipo detector utiliza una batería de 9 V. Abra el compartimiento para remover las baterías, asegúrese de respetar la polaridad al instalar las nuevas baterías.

NOTA IMPORTANTE.

Para el caso de media y alta tensión, se deberá usar una pértiga aislante. Con el prototipo detector montado en el extremo de la pértiga, acérquelo al equipo o conductor energizado hasta que se disparen las señales de alarma. Se elegirá el rango adecuado mediante el selector giratorio, de acuerdo al nivel de tensión a verificar. Es recomendable comenzar con un rango menor al nivel de voltaje a verificar y luego probar con rangos mayores.



Figura A.5 Vista lateral de módulo detector montado sobre una pértiga aislante de cabezal universal.

Por otro lado, las aperturas en cables pueden ser detectadas con el prototipo detector; con el conductor todavía energizado, ajuste la sensibilidad hasta que se dispare y se activen las alarmas, luego desplace el dispositivo a lo largo del cable hasta que se produzca un cambio de condición. Las alarmas deberían estar activadas cuando el sensor está sobre el lado energizado de la apertura y deberían desactivarse al pasar al otro lado de la misma.