

TECNOLOGICO NACIONAL DE MEXICO



Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Reporte Final de Año Sabático

B.1 Elaboración de apuntes/B1.2 Elaboración de apuntes de asignaturas:

Máquinas Eléctricas y Circuitos Eléctricos I

Periodo:

02 de septiembre de 2024 al 01 de septiembre de 2025

Profesor:

José Alejandro Morones Alba

Número de dictamen AS-2-212/2024

Aguascalientes, Ags., a 01 Septiembre de 2025

**A mi bella esposa
Laura Cecilia Rodríguez Martínez**

Asignatura 1:

Máquinas

Eléctricas

Clave oficial de la asignatura:
AEF-1040

Nombre del Programa educativo al que impacta:
Ingeniería Electrónica

Clave del programa educativo al que impacta:
IELC-2010-211

Objetivo general del trabajo propuesto “Máquinas Eléctricas”

Dinámicas investigaciones teóricas y de laboratorio para llegar a una rápida comprensión al analizar las máquinas eléctricas en régimen permanente. Los complementos educacionales (aprendizaje basado en problemas, aprendizaje basado en retos, aprendizaje basado en prácticas de laboratorio y proyecto de asignatura) permiten analizar las condiciones de arranque y operación de las máquinas eléctricas para una selección adecuada en función de sus aplicaciones.

Intensión didáctica de la asignatura

Es importante destacar las partes constitutivas que integran cada tipo de máquina y mostrar las diferencias que tienen con respecto a las demás, de igual manera se conceptualizan los principios de funcionamiento para integrar los conocimientos y realizar las pruebas a los diversos tipos de máquinas con la finalidad de determinar sus parámetros de operación.

Una vez abordados los estudios conceptuales y de aplicación, el alumno deberá interactuar con los diferentes tipos de máquinas de manera continua dentro del laboratorio, realizar las conexiones necesarias y simular las variables de las máquinas para verificar su comportamiento.

El contenido está dividido en 5 temas.

En el tema I, se retoman los conceptos fundamentales del electromagnetismo para fundamentar el principio de funcionamiento del transformador. Posteriormente se ven las características del transformador ideal y real, la regulación de tensión con diversos tipos de cargas, su rendimiento y las diversas conexiones de los transformadores y autotransformadores.

En el tema II se considera la máquina de corriente directa, sus partes constitutivas y su principio de funcionamiento como generador y motor; además, se analizan las diferentes conexiones con sus respectivas características, también se estudian los diversos tipos de arranque, control de velocidad y frenado de los motores, así como sus campos de aplicación.

El tema III comprende el análisis de la máquina síncrona, analizando sus partes constitutivas y principio de funcionamiento como generador y motor. Para el caso del generador se obtiene la fuerza electromotriz inducida, se interpretan los circuitos equivalentes y diagramas fasoriales y se calcula la regulación de tensión con diferentes cargas, además de la conexión en paralelo de varios generadores. Para el caso del motor se estudian los métodos de arranque, y se determina la potencia, el par electromagnético y su rendimiento, además de analizarlo bajo diferentes condiciones de carga y corriente de excitación.

El tema IV se enfoca en el análisis de los principios de funcionamiento de los motores de inducción y su aplicación en la industria. También se estudia el arranque y control de velocidad de los mismos.

En el tema V se hace énfasis en las partes constitutivas del motor de inducción monofásico y su principio de funcionamiento; se analizan el arranque y el control de su velocidad. De la misma forma, se estudian los diferentes tipos de motores como son: el de fase partida, de arranque por capacitor, de operación continua por capacitor, universal, de polos sombreados, de pasos y lineales. También se determina el tipo de aplicación.

Aportación de la asignatura al perfil profesional de la asignatura

Aporta la capacidad para entender el funcionamiento de las máquinas eléctricas y las habilidades para seleccionarlás, ponerlas en operación y controlarlas. Para integrarla, se ha revisado el tipo de máquinas eléctricas que existen y sobre todo aquellas que más uso y aplicación tienen.

Contribución académica

El objetivo general del trabajo propuesto “Máquinas Eléctricas” impacta en la competencia general y competencias específicas de la asignatura.

Competencia general de la asignatura

Analiza el funcionamiento de las diferentes máquinas eléctricas y realiza una adecuada selección para su aplicación, según el tipo de carga.

Competencias específicas a desarrollar en la asignatura

- | | |
|----------|---|
| Tema I | Fundamentos de electromagnetismo y transformador eléctrico
Conoce el principio de operación del transformador y comprende su funcionamiento para determinar su aplicación. |
| Tema II | Máquinas de corriente continua
Conoce el principio de funcionamiento de la máquina de corriente continua como generador y como motor para su adecuada selección y aplicación.
Realiza el arranque y control de velocidad de los motores de corriente continua. |
| Tema III | Máquinas síncronas
Aplica el principio de funcionamiento de la máquina síncrona como motor y como generador y su comportamiento en el sistema eléctrico para controlar su operación. |
| Tema IV | Motores de corriente alterna
Aplica las leyes del electromagnetismo para comprender el funcionamiento del motor de inducción. |
| Tema V | Motores especiales
Conoce el funcionamiento y características de los motores monofásicos de inducción y los diferentes tipos de máquinas especiales para determinar sus aplicaciones. |

El trabajo propuesto “Máquinas Eléctricas” implica ejecutar actividades adecuadas que permiten analizar y comprender los temas de la asignatura logrando la competencia general de la asignatura y competencias específicas a desarrollar en la asignatura logrando un aprendizaje significativo en el estudio de la asignatura “Máquinas Eléctricas”, contribuyendo al objetivo general y perfil de egreso de la carrera Ingeniería Electrónica.

Cada complemento educacional contiene los aspectos teóricos-técnicos fundamentales para concretar satisfactoriamente las actividades propuestas.

El trabajo propuesto será de gran beneficio académico para los profesores del departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica y en general a los profesores del sistema.

Índice

	página
Tema 1 Fundamentos de electromagnetismo y transformador eléctrico	
Apuntes	
1.1 Leyes fundamentales de electromagnetismo	2
1.2 Variables magnéticas	8
1.3 El circuito magnético	8
1.4 Principio operacional del transformador	10
1.5 Partes constitutivas del transformador	11
1.6 Análisis del transformador ideal	13
1.7 Análisis del transformador real y su circuito equivalente	16
1.8 Análisis de la regulación de tensión con diferentes tipos de cargas	18
1.9 Eficiencia de los transformadores a diferentes factores de potencia	20
1.10 Autotransformadores monofásicos	20
1.11 Conexiones de transformadores monofásicos en arreglos trifásicos	22
1.12 Conexiones de autotransformadores monofásicos en arreglos trifásicos	24
Complementos educacionales	
<i>Aprendizaje basado en problemas</i>	
Problema 1 Cálculo de la velocidad de las partículas libres dentro de un conductor (velocidad de arrastre)	26
Problema 2 Análisis de la ley de Faraday y Ley de Lenz	28
Problema 3 Análisis del transformador ideal y real	33
<i>Aprendizaje basado en retos</i>	
Reto 1 Construcción de la herramienta computacional “a) corriente alterna y b) solución del circuito resistivo-inductivo-capacitivo excitado con corriente alterna”	37
Reto 2 Construcción de la herramienta computacional “a) transformador ideal y b) transformador real”	44
<i>Aprendizaje basado en prácticas de laboratorio</i>	
Práctica 1 Efectos magnéticos	50
Práctica 2 El transformador	59
Práctica 3 El autotransformador	69
Práctica 4 Conexiones de transformadores trifásicos	72
Anexo Solución de las prácticas de laboratorio	80
Proyecto de asignatura	98
 Tema II Máquinas de corriente directa	
Apuntes	
2.1 Componentes de las máquinas de corriente directa	104
2.2 Principio operacional de las máquinas de corriente directa como generador y como motor	105
2.3 Tipos de generadores (excitación separada, derivación, serie y compuesto) y sus curvas características	113
2.4 Tipos de motores (derivación, excitación separada, serie y compuesto) y sus curvas características	116
2.5 Ecuación de par electromagnético para motores de corriente directa	120

2.6 Condiciones de arranque para los diferentes tipos de motores de corriente directa	122
2.7 Control de los motores de corriente directa	124
2.7.1 Arranque	
2.7.2 Velocidad	
2.7.3 Inversión de giro y	
2.7.4 Frenado	
2.8 Aplicaciones de los motores de corriente directa	128
Complementos educativos	
<i>Aprendizaje basado en problemas</i>	
Problema 1 Análisis del circuito magnético de la máquina de corriente directa	130
<i>Aprendizaje basado en retos</i>	
Reto 1 Análisis de la herramienta computacional “saturación”	139
Reto 2 Construcción de la herramienta computacional “análisis del generador de corriente directa y cálculo de su eficiencia”	144
Reto 3 Construcción de la herramienta computacional “determinación del dato nominal del motor de corriente directa, características electromecánicas y cálculo de su eficiencia”	148
<i>Aprendizaje basado en prácticas de laboratorio</i>	
Práctica 1 Principio del funcionamiento del motor de corriente directa	153
Práctica 2 Análisis del generador de corriente directa y cálculo de su eficiencia	157
Práctica 3 Determinación del dato nominal del motor de corriente directa, características electromecánicas y cálculo de su eficiencia.	178
Anexo Solución de las prácticas de laboratorio	191
 Tema III Máquinas síncronas	
Apuntes	
3.1 Componentes de las máquinas síncronas	223
3.2 Principio operacional de las máquinas síncronas como generador y como motor	223
3.3 Fuerza electromotriz inducida y frecuencia	224
3.4 Circuito equivalente y diagramas fasoriales	230
3.5 Regulación de tensión con diferentes tipos de carga	233
3.6 Operación en paralelo de los generadores sincrónicos	234
3.7 Métodos de arranque de los motores sincrónicos	237
3.8 Análisis fasorial del motor sincrónico bajo diferentes condiciones de carga y de excitación	239
3.9 Potencia, par electromagnético y rendimiento	241
Complementos educativos	
<i>Aprendizaje basado en problemas</i>	
Problema 1 Capacidad de transmisión	243
Problema 2 El generador síncrono	248
Problema 3 El motor síncrono	251

<i>Aprendizaje basado en retos</i>		
Reto 1	Construcción de la herramienta computacional “capacidad de transmisión”	254
Reto 2	Construcción de la herramienta computacional “el generador síncrono”	256
Reto 3	Análisis de la herramienta computacional “el motor síncrono”	259
<i>Aprendizaje basado en prácticas de laboratorio</i>		
Práctica 1	El generador síncrono	263
Práctica 2	El motor síncrono	276
Anexo	Solución de las prácticas de laboratorio	287
 Tema IV Motores de inducción		
Apuntes		
4.1	Principio y análisis del motor jaula de ardilla	306
4.2	Principio y análisis del motor con rotor devanado	312
4.3	Arranque y control de velocidad de los motores de inducción	314
4.4	Aplicaciones de los motores de inducción trifásicos	318
Complementos educativos		
<i>Aprendizaje basado en problemas</i>		
Problema 1	Análisis de los devanados desplegados	321
<i>Aprendizaje basado en retos</i>		
Reto 1	Análisis de la herramienta computacional “campo magnético pulsante”	327
Reto 2	Análisis de la herramienta computacional “campo magnético giratorio trifásico”	331
Reto 3	Construcción de la herramienta computacional “determinación del dato de placa del motor de inducción trifásico y características electromecánicas”	335
Reto 4	Análisis de la herramienta computacional “corrección del factor de potencia para cargas pasivas y activas monofásicas”	337
Reto 5	Análisis de la herramienta computacional “el controlador de potencia reactiva con corrección del factor de potencia”	341
<i>Aprendizaje basado en prácticas de laboratorio</i>		
Práctica 1	Análisis preliminar del motor de inducción trifásico y conexiones trifásicas	351
Práctica 2	Determinación del dato de placa del motor de inducción trifásico y características electromecánicas	362
Práctica 3	El controlador de potencia reactiva	367
Anexo	Solución de las prácticas de laboratorio	378

Tema V Motores especiales

Apuntes

5.1	Elementos básicos de los motores monofásicos	403
5.2	Principio de operación del motor monofásico de inducción	405
5.3	Arranque de los motores monofásicos de inducción	405

5.4 Devanados de fase partida (motor monofásico de fase hendida)	406
5.5 Arranque por capacitor	408
5.6 operación continua por capacitor	409
5.7 Motor universal	410
5.8 Motor de polos sombreados	411
5.9 Motor de pasos	412
5.10 Motores lineales	421
5.11 Aplicación de los motores especiales	432
Complementos educativos	
<i>Aprendizaje basado en problemas</i>	
Problema 1 Análisis del devanado desplegado del motor de inducción monofásico con condensador de arranque	437
Problema 2 Análisis del funcionamiento del motor de pasos	441
<i>Aprendizaje basado en retos</i>	
Reto 1 Construcción de la herramienta computacional “determinación del dato de placa del motor de inducción monofásico con condensador arranque y características electromecánicas”	443
Reto 2 Construcción de la herramienta computacional “determinación del dato de placa del motor de inducción monofásico con condensador de marcha y características electromecánicas”	444
Reto 3 Construcción de la herramienta computacional “determinación del dato de placa del motor universal y características electromecánicas”	446
<i>Aprendizaje basado en prácticas de laboratorio</i>	
Práctica 1 Determinación del dato de placa del motor de inducción con condensador de arranque y características electromecánicas	450
Práctica 2 Determinación del dato de placa del motor de inducción con condensador de marcha y características electromecánicas	464
Práctica 3 Determinación del dato de placa del motor universal y características electromecánicas	475
Práctica 4 Control del motor de pasos	484
Anexo Solución de las prácticas de laboratorio	487
Apéndice	
Sistema Internacional de Medidas (SI)	517
Código Eléctrico Nacional	520
Equivalentes R/X	524

Introducción

La electrotecnia se ocupa de analizar cómo funcionan las máquinas y aparatos que utilizan o producen electricidad, incluyendo el transformador, y es una especialidad dentro de la ingeniería.

Aunque la mayoría de las personas al oír la palabra transformadores, piensan en algo ajeno a ellos, esto es verdad, ya que gracias a ellos es que las casas, establecimientos, negocios y empresas pueden tener energía eléctrica, y de esta manera los habitantes y usuarios pueden llevar a cabo sus actividades y conectar todo tipo de aparatos como televisiones, computadoras, cargadores, electrodomésticos, refrigeradores, entre muchos más objetos que necesitan de la energía eléctrica para poder funcionar.

Las máquinas de corriente directa se han caracterizado debido a la facilidad con la que se pueden controlar, por su gran variedad de aplicaciones y su versatilidad en campos donde se requiere de un amplio rango de velocidades. Mediante diversas combinaciones de sus devanados se puede hacer que exhiban una amplia variedad de curvas características volt-ampere y velocidad-par, tanto para funcionamiento dinámico como para estado estable.

En nuestra nación, al igual que en otras partes del planeta, para que funcione el sistema eléctrico de potencia, es necesario transformar grandes volúmenes de energía primaria (como petróleo, gas natural, agua, carbón y uranio) en energía eléctrica y potencia eléctrica. La electricidad se puede trasladar y transformar en diferentes tipos de energía de manera limpia y eficiente. Actualmente, la máquina síncrona es la más común para realizar la conversión de grandes volúmenes de energía eléctrica y mecánica. Según el tipo de sistema mecánico que se utilice, las máquinas síncronas se pueden fabricar con un rotor liso si van a funcionar a alta velocidad, o bien con un rotor de polos salientes si su funcionamiento es a baja velocidad. A pesar de que una gran parte de las máquinas síncronas se utiliza como generadores en las centrales eléctricas, principalmente por su alta eficiencia y la capacidad de controlar la tensión, muchas veces se utilizan en la industria como motores. La máquina síncrona se puede usar como generador y como motor y, cada vez hay más usos donde ofrece grandes beneficios, sobre todo cuando se controla a través de fuentes electrónicas que permiten variar la frecuencia y el voltaje.

El primer prototipo del motor eléctrico capaz de funcionar con corriente alterna fue desarrollado y construido por el ingeniero Nikola Tesla y presentado en el American Institute of Electrical Engineers en 1888.

Los motores especiales tienen gran aplicación en el ámbito doméstico, comercial e industrial.

Los motores eléctricos impulsan bombas, ventiladores, grúas, perforadoras y una gran cantidad de herramientas y dispositivos mecánicos. No es fácil incorporar tales dispositivos como parte de un equipo de laboratorio, y en consecuencia, se usa en su lugar un generador de corriente directa. Cuando un generador de este tipo se acopla a un motor eléctrico, se puede variar fácilmente la carga mecánica, de la manera en que se desee. Por lo tanto, es posible simular casi cualquier carga mecánica con un generador de corriente directa. En algunos experimentos de laboratorio se usa también el freno mecánico (electrodinamómetro).

A los grandes alternadores que generan electricidad los impulsa una fuente de energía que puede ser una máquina diesel, una turbina de gas o de vapor. En áreas donde se dispone de la energía

que proporciona el agua se emplean turbinas hidráulicas. La energía que genera una turbina puede variar regulando mecánicamente el flujo del agua, el vapor o el gas que se precipita a través de ella. Obviamente, no es práctico llevar turbinas hidráulicas, de vapor o de gas a un laboratorio, para impulsar los alternadores; en lugar de ello, es preferible usar un motor de corriente directa. La energía que desarrolla un motor de este tipo puede controlarse fácilmente y, con él, se puede duplicar el funcionamiento de cualquier turbina. Es una fortuna que también pueda usarse el generador de corriente directa como un motor de corriente directa, para realizar el trabajo de las diversas turbinas mencionadas anteriormente.

Los apuntes muestran los aspectos teóricos básicos para analizar las máquinas eléctricas.

El complemento educacional relativo a **problemas** introduce al estudiante al uso de los modelos matemáticos para analizar las máquinas eléctricas.

El complemento educacional relativo a **retos** implica que el estudiante analice y desarrolle herramientas computacionales para analizar las máquinas eléctricas.

El complemento educacional relativo a las **prácticas de laboratorio** demuestra la importancia del estudio del transformador, la máquina de corriente directa, la máquina síncrona, el motor de inducción y los motores especiales. Sus diversas formas de conexión y sus aplicaciones.

Se emplean alternadores, motores, capacitores, reactores, resistores y medidores económicos, de baja potencia y eléctricamente seguros. A pesar de su tamaño pequeño (comparados con los gigantes de la industria), estas máquinas y dispositivos eléctricos están diseñados para funcionar exactamente de la misma manera, bajo condiciones transitorias estables.

Tema 1

“Fundamentos de electromagnetismo y transformador eléctrico”



1.1 Leyes fundamentales del electromagnetismo

Experimento de Oersted

Fue realizado en 1820 por el físico danés Hans C. Oersted.

“Toda corriente eléctrica que fluye a través de un conductor genera a su alrededor un campo magnético que puede cambiar la posición de una aguja magnética situada cerca del conductor, orientándola en una dirección perpendicular a la dirección de la corriente”.

El sentido del flujo magnético alrededor del conductor por efecto de la corriente (corriente convencional: corriente de positivo a negativo), se determina por medio de la regla de la mano derecha. Se cubre con la mano el conductor con el pulgar apuntando el sentido de la corriente, los otros dedos de la mano indicarán el sentido de las líneas del flujo magnético (figura 1).

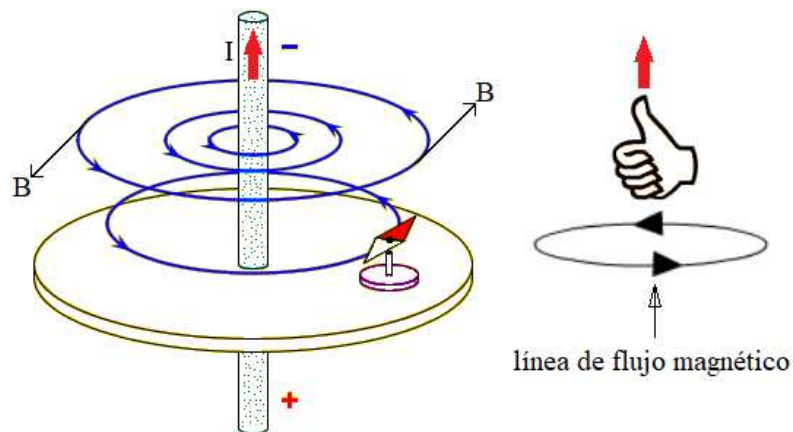


Figura 1 Sentido del flujo magnético alrededor del conductor.

Ley de Biot y Savart

Físicos que estudiaron los efectos magnéticos de la corriente eléctrica, la ley permite cuantificar:

a) *Para un conductor largo y recto* (figura 2). La magnitud de el vector inducción magnética **B** creada por una corriente eléctrica **I** en un conductor largo y recto en un punto p, está dado por la ecuación 1.

$$B = \frac{I}{d} (2 \times 10^{-7}) \quad \text{para el vacío} \quad 1$$

Donde:

I intensidad de corriente (A)

d distancia desde p al conductor (m)

B inducción magnética o densidad de flujo magnético (Wb/m² ó T)

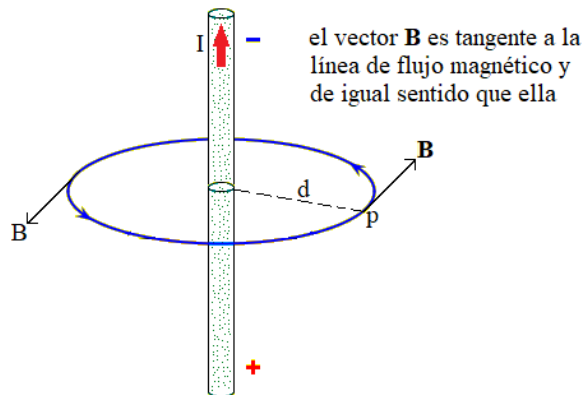


Figura 2 Inducción magnética para un conductor largo y recto.

b) Para una espira (figura 3). Si actúa una de las caras de la espira como polo **N** y la otra cara como polo **S**, entonces la magnitud de la inducción magnética **B** en el centro está dado la por la ecuación 2.

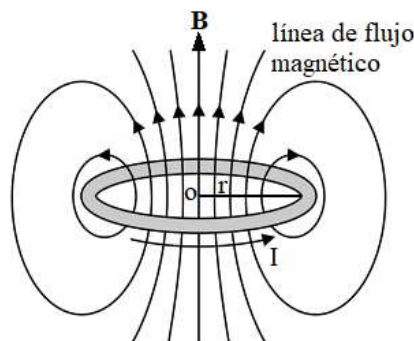


Figura 3 Inducción magnética para una espira.

$$B = \frac{I}{r} (2\pi \times 10^{-7}) \quad \text{para el vacío} \quad 2$$

Donde:
r radio de la circunferencia (m)

c) Para un solenoide o bobina (figura 4). La magnitud de la inducción magnética **B** en el centro está definida por la ecuación 3.

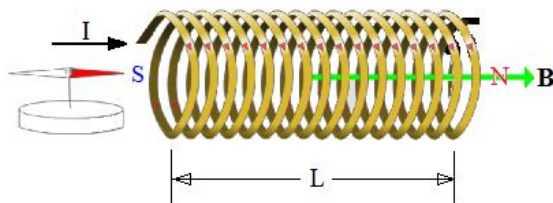


Figura 4 Inducción magnética para un solenoide o bobina.

$$B = \frac{NI}{L} (4\pi \times 10^{-7}) \quad \text{para el vacío} \quad 3$$

Donde:
N número de espiras
L longitud del solenoide (m)
B inducción magnética en el centro (T)

d) *Fuerza magnética sobre un conductor “Fuerza de Lorentz”* (figura 5). Si un conductor con corriente eléctrica se encuentra en un campo magnético; sobre dicho conductor actúa una fuerza resultante que es perpendicular al plano determinado por la corriente y el vector campo magnético (figura 5a). Considerando la corriente convencional la dirección de la fuerza se determinarse por la regla de la mano izquierda. Se colocan mutuamente a ángulos rectos los dedos pulgar, índice y medio, con el índice apuntando el sentido del flujo y el medio el sentido de la corriente, por lo que el dedo pulgar indicara la dirección de la fuerza (figura 5b).

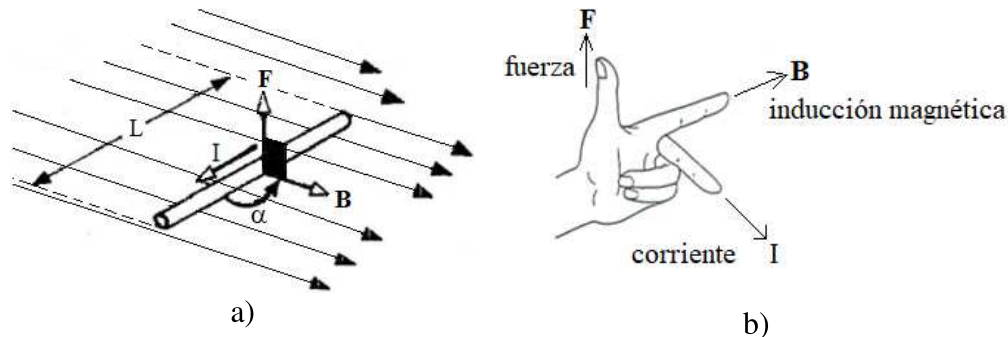


Figura 5 a) Fuerza magnética sobre un conductor b) Regla de la mano izquierda.

La orientación de la fuerza también se puede establecer utilizando la regla de la mano derecha, donde el índice señala la dirección de la corriente y el medio indica la dirección del flujo; el dedo pulgar mostrará la dirección de la fuerza (figura 6).

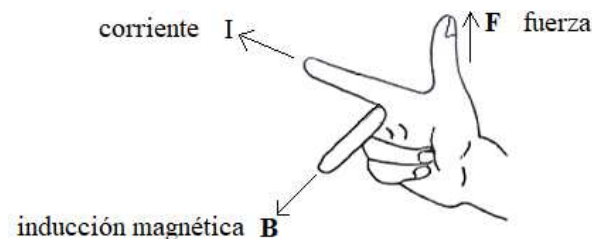


Figura 6 Regla de la mano derecha.

La ley de Biot-Savart se utiliza para calcular la fuerza que actúa sobre un conductor en un campo magnético. Cuando las líneas de flujo magnético hacen un ángulo α con el conductor que lleva corriente eléctrica, la fuerza se determina mediante la ecuación 4.

$$F = N B I L \sin \alpha \quad 4$$

Donde:

- N número de conductores
- B inducción magnética (T)
- I corriente eléctrica (A)
- L longitud activa del conductor (m)
- α ángulo que el conductor forma con las líneas del campo magnético ($^{\circ}$)

e) *Fuerza magnética entre dos conductores* (figura 7). Recordando que toda corriente crea su propio campo magnético, resulta lógico que dos corrientes interactúan entre sí, con fuerzas de

igual intensidad, que serán de atracción si las corrientes llevan la misma dirección, y de repulsión si sus direcciones son contrarias, esta fuerza se determinada usando la ecuación 5.

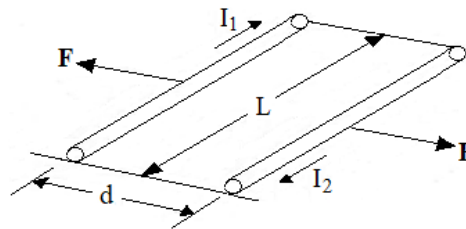


Figura 7 Fuerza magnética entre dos conductores.

$$F = \frac{I_1 I_2 L}{d} (2 \times 10^{-7}) \quad \text{para el vacío}$$

5

Donde:

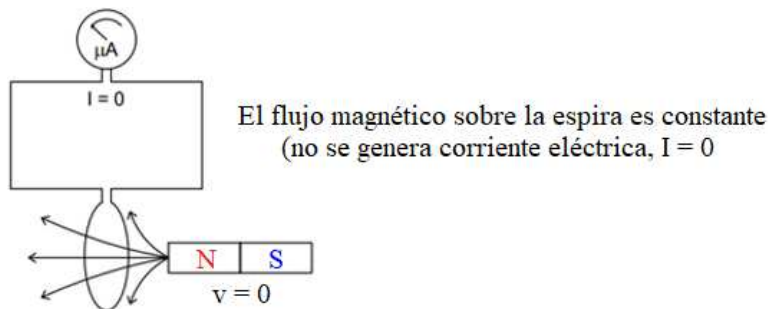
I_1 e I_2 corriente eléctrica en el conductor 1 y en el conductor 2 (A)

L longitud de los conductores (m)

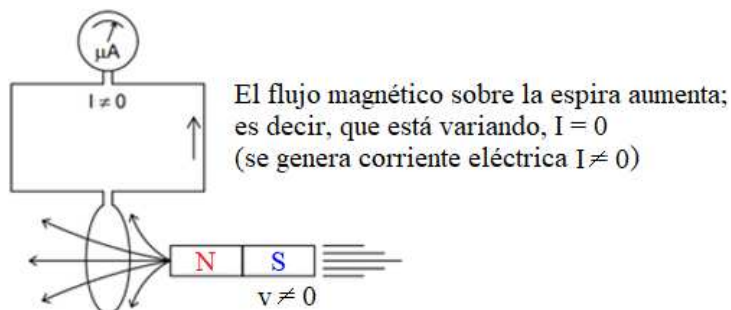
d separación entre los conductores (m)

Inducción electromagnética

Un campo magnético se genera cuando hay una corriente eléctrica o una carga que se está moviendo. En 1831 Michael Faraday demostró luego de sucesivos experimentos que se puede crear corriente eléctrica variando el flujo magnético que atraviesa una espira (figura 8b). A partir de estos experimentos se han desarrollado los generadores de corriente alterna y corriente directa, el transformador, el teléfono, etc.



a) Imán en reposo



b) Imán en movimiento

Figura 8 Experimento de Faraday a) Imán en reposo b) Imán en movimiento.

Definición:

1.- Inducción electromagnética. Es aquel fenómeno que consiste en generar corriente eléctrica variando el “flujo magnético”. Fue descubierta casi simultáneamente por tres eminentes científicos: el norteamericano Joseph Henry, el inglés Michael Faraday y el ruso Heinrich F.E. Lenz.

2.- Flujo magnético. Es una cantidad física que se considera escalar y se describe como la cantidad de líneas de flujo magnético que pasan de manera perpendicular a una superficie plana.

→ Cuando el campo magnético es constante y la superficie plana está en ángulo recto con respecto a las líneas de flujo magnético (figura 9), se tiene:

$$\phi_m = B A \quad 6$$

Donde:

B densidad de flujo magnético (T)

A área (m²)

ϕ_m flujo magnético (Wb)

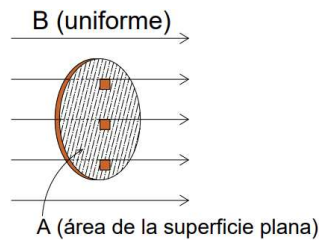
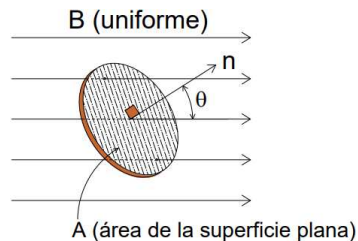


Figura 9 La superficie forma un ángulo recto con respecto a las líneas de flujo magnético.

→ Si el campo magnético es constante y la superficie plana no forma un ángulo recto con respecto a las líneas de flujo magnético (figura 10), se tiene:

$$\phi_m = B A \cos \theta \quad 7$$



θ , ángulo que se forma entre los vectores B y n (vector normal a la superficie plana)

Figura 10 La superficie plana no forma un ángulo recto con respecto a las líneas de flujo magnético.

Ley de Faraday (E_{ind})

Fue establecida por el británico Michael Faraday en 1831, ley que permite determinar la tensión inducida en un circuito.

“El flujo magnético que atraviesa un conductor debe cambiar para que se genere corriente en él”.

Lo anterior implica que, cuando varía el flujo magnético se induce una tensión “ E_{ind} ” que hace posible que circule una corriente eléctrica en el conductor (figura 11).

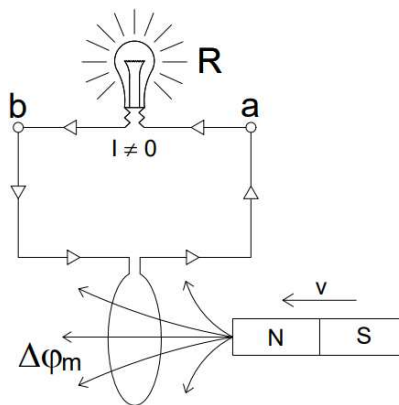


Figura 11 Ley de Faraday.

Matemáticamente y considerando la figura anterior (para una espira):

$$E_{ind} = - \left| \frac{\Delta \Phi_m}{\Delta t} \right| \quad \text{Ley de Faraday} \quad 8$$

Donde:

$$E_{ind} = V_{ab} = e(t)$$

fuerza electromotriz inducida (V)

$$\Delta \Phi_m$$

variación del flujo magnético (Wb)

$$\Delta t$$

intervalo de tiempo (s)

Si el flujo magnético varía en función del tiempo entonces:

$$E_{ind} = e(t) = -N \frac{d\Phi_m}{dt} \quad \text{Ley de Faraday} \quad 9$$

Donde:

N número de espiras

Ley de Lenz

Fue establecida por el ruso Heinrich Friedrich Emil Lenz en 1831, ley que permite determinar el sentido de la corriente inducida en algún circuito.

Existen dos casos:

CASO A. Cuando el flujo magnético (ϕ_{ext}) sobre la espira “aumenta”

En este caso “las líneas del flujo exterior y las líneas del flujo inducido tienen sentidos contrarios”.

La dirección de la corriente se halla empleando la mano derecha empleando las líneas del flujo magnético inducido.

CASO B. Cuando el flujo magnético (ϕ_{ext}) sobre la espira “disminuye”

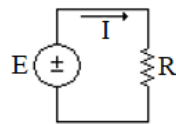
En este caso “las líneas del flujo exterior y las líneas del flujo inducido tienen el mismo sentido”.

1.2 Variables magnéticas

El área que ocupa el flujo magnético se llama circuito magnético, y su funcionamiento se rige por ecuaciones similares a las que se usan en un circuito eléctrico.

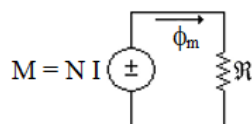
Usando la analogía, se tiene que la ecuación 10 es la *ley de Ohm para circuitos magnéticos*.

$$\phi_m = \frac{M}{\mathfrak{R}} \quad 10$$



$$I = \frac{E}{R}$$

a) Circuito eléctrico



$$\phi_m = \frac{M}{\mathfrak{R}}$$

b) Circuito magnético

Donde:

M fuerza magnetomotriz (A.vuelta)

ϕ_m flujo magnético (wb)

$\mathfrak{R}$ resistencia magnética o reluctancia del circuito magnético (A.vuelta/wb)

Figura 12 Analogía entre el circuito eléctrico y el circuito magnético.

El factor NI es análogo a E (fuerza electromotriz) en algún circuito eléctrico y se llama fuerza magnetomotriz M o fuerza magnetizante.

1.3 El circuito magnético

La fuerza magnetomotriz genera el flujo magnético ϕ_m (figura 13).

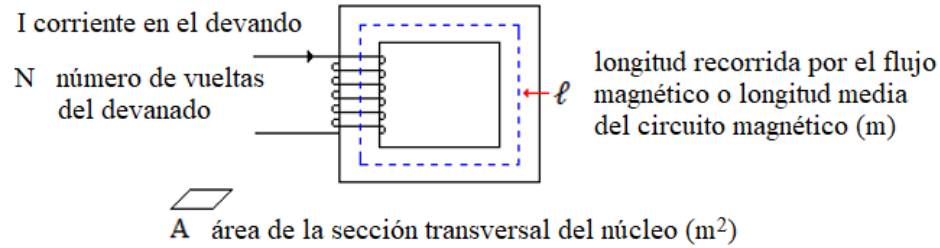


Figura 13 El circuito magnético.

La ley que gobierna la creación del campo magnético a partir de una corriente eléctrica es conocida como la ley de Ampere. Para un solenoide:

$$H = \frac{NI}{\ell} \quad \frac{\text{Ampere} \cdot \text{vuelta}}{\text{m}} \quad 11$$

La relación entre la intensidad del campo magnético H y la densidad de flujo magnético B es:

$$B = \mu H \quad \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = \text{Tesla} \quad 12$$

La permeabilidad magnética μ resulta función de la permeabilidad relativa del medio μ_r con la permeabilidad magnética del vacío μ_o .

$$\mu = \mu_r \mu_o = \mu_r 4\pi \times 10^{-7} \quad \frac{\text{Wb}}{\text{A m}} \quad 13$$

Para el aire $\mu_r = 1$, mientras que para el hierro μ_r es una variable que depende de la saturación del circuito magnético.

Se sabe que la relación entre el flujo magnético ϕ_m , el área A y la densidad de flujo magnético B la define la ecuación 6.

Sustituyendo la ecuación 12 en la ecuación 6 y usando la ecuación 11 se tiene:

$$\phi_m = \mu A \frac{NI}{\ell} \quad 14$$

Usando la ley de Ohm para circuitos magnéticos (ecuación 10) se obtiene:

$$\mathfrak{R} = \frac{\ell}{\mu A} \quad 15$$

La $\mathfrak{R}$ similar a la resistencia eléctrica, depende de la longitud ℓ , área A y la permeabilidad magnética μ . La $\mathfrak{R}$ depende de μ . Como en materiales magnéticos μ varía con la fuerza magnetizante, la $\mathfrak{R}$ también varía en aquellos materiales con la fuerza magnetizante.

Compare la ecuación 16 con la ecuación 15. La ecuación 16 define la resistencia eléctrica.

$$R = \rho \frac{L}{A} = \frac{L}{\sigma A} \quad 16$$

En un circuito serie de circuitos magnéticos, la reluctancia equivalente es:

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \cdots + \mathcal{R}_n \quad 17$$

En un circuito paralelo, la reluctancia total es:

$$\frac{1}{\mathcal{R}_{eq}} = \frac{1}{\mathcal{R}_1} + \frac{1}{\mathcal{R}_2} + \cdots + \frac{1}{\mathcal{R}_n} \quad 18$$

Los cálculos de flujo en un núcleo, utilizando ideas de circuitos magnéticos, son siempre estimaciones. En las mejores situaciones, se obtienen resultados con errores que rondan el 5% en comparación con la respuesta real.

1.4 Principio operacional del transformador

Es probable que los transformadores sean el tipo de equipo más utilizado en la industria de la electricidad. Su tamaño puede ir desde pequeños dispositivos para radios de transistores, hasta enormes máquinas que pueden pesar toneladas y se utilizan en las estaciones de distribución de energía.

Todos los transformadores comparten características fundamentales similares. Cuando hay inducción mutua entre dos devanados o bobinas, cualquier alteración de la corriente que fluye a través de uno genera un voltaje en el otro. Cada transformado cuenta con un devanado primario y uno o uno o más secundarios. El devanado primario toma energía de una fuente de alimentación y transmite esa energía al devanado secundario a través de un campo magnético cambiante. Esta energía se manifiesta como una fuerza electromotriz que se presenta en el devanado secundario y, al conectar una carga a este, la energía se transfiere a la carga. Por lo tanto, es posible transferir energía eléctrica de un circuito u otro sin necesidad de una conexión física entre ellos. Los transformadores son esenciales para la distribución de energía en corriente alterna, ya que tienen la capacidad de transformar la potencia eléctrica de una corriente y voltaje dados, en una potencia equivalente a otra corriente y voltaje dados.

Todos los transformadores tienen las mismas propiedades básicas. Cuando existe una inducción mutua entre dos bobinas o devanados, un cambio en la corriente que pasa por uno de ellos induce un voltaje en el otro. Todos los transformadores poseen un devanado primario y uno o más secundarios. El devanado primario recibe energía de una fuente de alimentación y acopla esta energía al devanado secundario mediante un campo magnético variable. La energía toma la forma de una fuerza electromotriz que pasa por el devanado secundario y, si se conecta una carga a éste, la energía se transfiere a la carga. Así pues, la energía eléctrica se puede transferir de un circuito a otro sin que exista una conexión física entre ambos. Los transformadores son indispensables en la distribución de potencia en corriente alterna, ya que pueden convertir la potencia eléctrica que esté a una corriente y voltaje dados, en una potencia equivalente a otra corriente y voltaje dados.

Un transformador es un dispositivo que hace posible cambiar los voltajes y corrientes sin alterar la potencia o la frecuencia. Esta función de transformación se fundamenta en el proceso de la inducción electromagnética.

Cuando un transformador opera, las corrientes alternas circulan a través de sus bobinas, generando un campo magnético alternante en el núcleo de metal. Esto provoca pérdidas tanto en el cobre como en el hierro, lo que representa una potencia real y ocasiona que el transformador se caliente. Para crear este campo magnético, se necesita una potencia reactiva que se obtiene de la red eléctrica. Debido a esto, la potencia total que llega al devanado primario es siempre un poco mayor que la potencia total que sale del devanado secundario.

1.5 Partes constitutivas del transformador

La figura 14 presenta un transformador monofásico simple que cuenta con dos devanados, los cuales están enrollados alrededor de un núcleo magnético. Se asume que el transformador está funcionando con una excitación senoidal en estado estacionario. En la representación se indican las tensiones fasoriales E_1 y E_2 que se aplican a los devanados, junto con las corrientes fasoriales I_1 que ingresan al devanado 1, que tiene N_1 vueltas, e I_2 que sale del devanado 2, que cuenta con N_2 vueltas. Además, se ilustra el flujo magnético ϕ_c presente en el núcleo y un fasor correspondiente a la intensidad del campo magnético, H_c . El núcleo posee una sección transversal identificada como A_c , una longitud media del circuito magnético ℓ_c y una permeabilidad μ_c , que se considera constante.

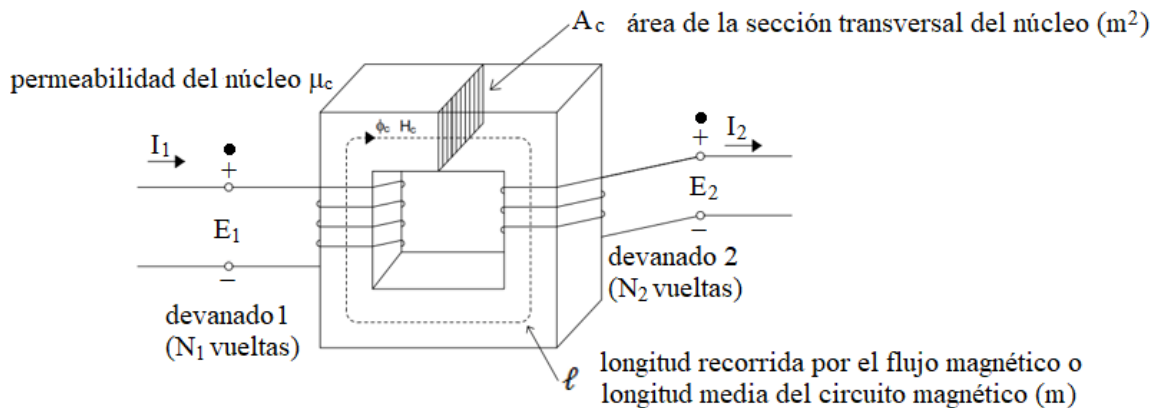


Figura 14 Transformador monofásico básico de dos devanados.

Marcas de polaridad.

Cuando se activa el devanado primario de un transformador mediante una fuente de corriente alterna, se genera un flujo magnético que varía en el núcleo del transformador. Este flujo enlaza las bobinas de cada devanado, provocando la inducción de voltajes de corriente alterna en ellas. De acuerdo con la definición, un voltaje de corriente alterna se modifica constantemente tanto en valor como en polaridad, por lo que el voltaje que llega al devanado primario (terminales 1 y 2) cambia de polaridad entre la terminal 1 y la terminal 2 de forma continua (figura 15). Las terminales 1 y 2 nunca pueden presentar la misma polaridad. La terminal 1 siempre debe ser positiva o negativa en relación con la terminal 2. Así, el flujo magnético que cambia de dirección induce voltajes en todos los otros devanados (4 secundarios), lo que resulta en un voltaje de

corriente alterna en cada par de terminales. También las terminales en cada devanado varían su polaridad entre sí.

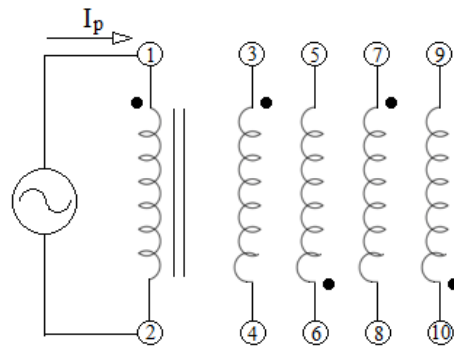


Figura 15 Un primario y 4 secundarios.

Cuando se menciona la "polaridad" de los devanados en un transformador, se refiere a la tarea de reconocer todas las terminales que comparten la misma polaridad, ya sea positiva o negativa, al mismo tiempo. Normalmente, se emplean marcas de polaridad para diferenciar estas terminales. Generalmente, estas marcas aparecen como puntos "o +" y muestran cuáles terminales tienen la misma polaridad. Por ejemplo, en la figura 15, las marcas de polaridad indican que en un momento específico, cuando 1 es positivo en comparación con 2, 3 es positivo en relación con 4, 6 es positivo respecto a 5, 7 es positivo en comparación con 8 y 10 es positivo en relación con 9.

Es importante destacar que una terminal no puede ser positiva por su cuenta, solo puede serlo en relación a otra terminal. Por lo tanto, en cualquier momento, las terminales 1, 3, 6, 7 y 10 son positivas en comparación con las terminales 2, 4, 5, 8 y 9.

Cuando las baterías o celdas se unen en serie para conseguir un voltaje de salida más alto, es necesario que la terminal positiva de una batería se conecte a la terminal negativa de la siguiente. Al hacerlo de este modo, se suman los voltajes de cada una. De manera similar, si se quiere sumar o hacer aditivos los voltajes de un transformador conectándolo en serie, se debe unir la terminal que tiene la "marca de polaridad" de un devanado con la terminal "no marcada" del otro devanado. Según lo mostrado en la figura 15, si se enlazan las terminales 4 y 6, 5 y 7, y 8 y 10 entre las terminales 3 y 9, se obtendrá la suma de las tensiones inducidas en los devanados (lo que se llama conexión serie aditiva). Al conectar dos o más devanados, las polaridades relativas en un momento determinado afectan significativamente el voltaje resultante.

Para identificar la polaridad de los devanados en el transformador, se examina el circuito que se muestra en la figura 16. Preste atención a cómo se mueve la aguja del voltímetro de corriente continua cuando se activa el interruptor s . Si la aguja se mueve brevemente hacia la derecha, significa que las terminales 1 y 3 tienen la misma polaridad (la terminal 1 se une al + de la fuente de alimentación de corriente continua, y la terminal 3 se conecta al positivo del voltímetro de corriente continua).

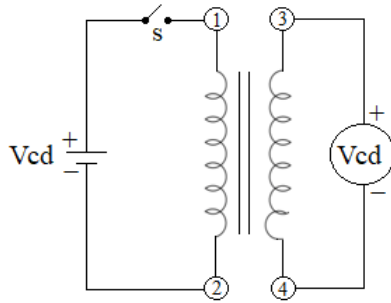


Figura 16 Determinación de las marcas de polaridad del transformador.

1.6 Análisis del transformador ideal

Para un transformador ideal, se supone lo siguiente:

- 1 Los devanados tienen una resistencia de 0, así que las pérdidas I^2R en ellos son nulas.
- 2 La permeabilidad del núcleo es infinita μ_c , lo que se traduce en una reluctancia nula del núcleo.
- 3 No existe un flujo de dispersión; esto significa que el flujo total ϕ_c se mantiene dentro del núcleo y enlaza los dos bobinados.
- 4 No existen pérdidas en el núcleo.

La imagen 17 presenta un diagrama esquemático de un transformador con dos bobinas.

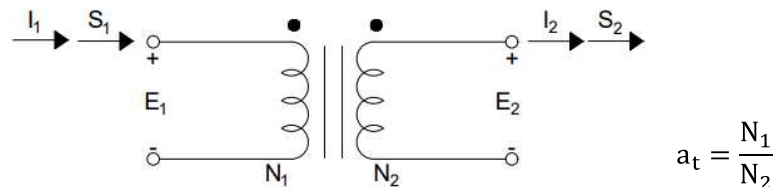


Figura 17 Diagrama esquemático de un transformador con dos bobinas.

Las leyes de Ampere y Faraday se pueden usar junto con las suposiciones mencionadas antes para derivar las relaciones del transformador ideal. Según la ley de Ampere, la parte del vector de intensidad del campo magnético que es tangencial, cuando se suma a lo largo de un camino cerrado, es igual a la corriente total que está dentro de ese camino; esto es:

$$\oint H_{\tan} dl = I_{\text{encerrada}} \quad 19$$

Si se escoge la línea central del núcleo, que aparece en la figura 14, como la trayectoria cerrada, y se mantiene H_c constante en toda la trayectoria, además de ser tangente a esta, entonces la ecuación mencionada anteriormente se expresa de la siguiente manera:

$$H_c l_c = N_1 I_1 - N_2 I_2 \quad 20$$

Es importante notar que la corriente I_1 está encerrada un total de N_1 veces, mientras que la corriente I_2 está encerrada N_2 veces. Al aplicar la regla de la mano derecha, encontramos que la corriente I_1

produce un flujo que sigue el sentido de las agujas del reloj, en cambio, la corriente I_2 genera un flujo que va en sentido opuesto. Por lo tanto, en la ecuación 20, la corriente total encerrada se representa como $N_1 I_1 - N_2 I_2$. Si asumimos que la permeabilidad del núcleo, μ_c , se mantiene constante, la densidad de flujo magnético, B_c , también permanecerá constante dentro de este núcleo:

$$B_c = \mu_c H_c \quad 21$$

Y el flujo en el núcleo es:

$$\phi_c = B_c A_c \quad 22$$

Usando las ecuaciones 21 y 22 en la ecuación 20, se tiene:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = \frac{l_c B_c}{\mu_c} = \left(\frac{l_c}{\mu_c A_c} \right) \phi_c \quad 23$$

El factor entre paréntesis es la reluctancia, $\mathfrak{R}$. Por lo tanto:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = \frac{l_c B_c}{\mu_c} = \mathfrak{R} \phi_c \quad 24$$

La fórmula 23 representa la **Ley de Ohm** aplicada a un circuito magnético, en la cual la fuerza magnetomotriz total se establece mediante el primer elemento de la fórmula 24. La reluctancia, que impide la aparición del flujo en el circuito magnético, es similar a la resistencia en un circuito eléctrico.

En un transformador perfecto, se asume que μ_c es infinita. Esto resulta en que la reluctancia se convierte en 0 y la ecuación 23 se simplifica en:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad 25$$

En la realidad, los enrollamientos y los núcleos de los transformadores de potencia se encuentran dentro de contenedores, lo que hace que no se pueda ver la dirección de los enrollamientos. Una manera de comunicar la información sobre los enrollamientos es colocar un punto en uno de sus extremos, de modo que al ingresar la corriente en ese punto, genere una fmm que opera en la misma dirección. La figura 17 ilustra esta convención de los puntos (indicadores de polaridad).

La corriente I_1 se representa en la ecuación 24 como fluyendo hacia su terminal marcado con punto, mientras que I_2 sale de su terminal también con punto. Por esta razón, I_1 e I_2 están en fase, de acuerdo a la relación $I_1 = (N_2/N_1)I_2$. Si se cambiara la dirección de I_2 , de modo que ambas corrientes entraran en sus terminales con punto, I_1 estaría desfasada 180° respecto a I_2 .

La fórmula 9 (Ley de Faraday) define la tensión $e(t)$ que se genera en un devanado con N vueltas debido a un flujo ϕ que cambia con el tiempo y que está asociado al devanado. Asumiendo un flujo senoidal en un estado estable con una velocidad angular constante ω , y usando los fasores E y Φ para representar $e(t)$ y $\phi_c(t)$ respectivamente, la fórmula 9 es:

$$E = N(j\omega)\Phi \quad 26$$

En un transformador perfecto, se considera que todo el flujo magnético está encerrado dentro del núcleo, conectando los dos devanados. De acuerdo con la Ley de Faraday, los voltajes que se inducen en los devanados mostrados en la figura 14 son:

$$E_1 = N_1(j\omega)\Phi_c \quad 27$$

$$E_2 = N_2(j\omega)\Phi_c \quad 28$$

Dividiendo la ecuación 27 entre la 28 resulta:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad 29$$

Las marcas de polaridad en la imagen 17 muestran que las tensiones E_1 y E_2 , que tienen sus polaridades + en los puntos de las terminales, están en la misma fase. Si la polaridad de una de las tensiones de la figura 17 se cambiara, E_1 estaría en un desfase de 180° con respecto a E_2 .

La relación de transformación, a_t , se explica de la siguiente manera:

$$a_t = \frac{N_1}{N_2} \quad 30$$

Si se emplea a_t en las ecuaciones 25 y 29, las relaciones fundamentales para un transformador ideal monofásico de dos bobinados son:

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{I_2}{a_t} \quad 31$$

$$E_1 = \frac{N_1}{N_2} E_2 = a_t E_2 \quad 32$$

A partir de las ecuaciones 31 y 32, se pueden obtener dos relaciones adicionales que se refieren a la impedancia compleja y la potencia. La potencia compleja que ingresa al devanado 1 de la figura 17 es:

$$S_1 = E_1 I_1^* = (a_t E_2) \left(\frac{I_2}{a_t} \right)^* = E_2 I_2^* = S_2 \quad 33$$

La potencia compleja S_1 que ingresa al devanado 1 es equivalente a la potencia compleja S_2 que sale del devanado 2. Esto significa que un transformador ideal no presenta pérdida de potencia, ya sea real o reactiva.

Si a las terminales del devanado 2 del transformador ideal que se muestra en la figura 17 se le conecta una impedancia Z_2 , entonces:

$$Z_2 = \frac{E_2}{I_2} \quad 34$$

Esta impedancia, al ser medida desde el bobinado 1, resulta ser:

$$Z'_2 = \frac{E_1}{I_1} = \frac{a_t E_2}{\frac{I_2}{a_t}} = a_t^2 Z_2 \quad 35$$

1.7 Análisis del transformador real y su circuito equivalente

En la figura 18, se presenta un circuito que representa un transformador monofásico real de dos bobinas, el cual tiene diferencias con respecto al transformador ideal en lo siguiente:

- 1 Los arrollamientos poseen resistencia.
- 2 La permeabilidad del núcleo, μ_c , es finita.
- 3 El flujo magnético no está confinado por completo al núcleo.
- 4 Existen pérdidas de potencia, tanto real como reactiva, en el núcleo.

Se coloca la resistencia R_1 en serie con el devanado 1 para tener en cuenta las pérdidas I^2R en dicho devanado. Además, se incorpora una reactancia X_1 , conocida como reactancia de dispersión del devanado 1, en serie con R_1 para considerar el flujo de dispersión. Este flujo de dispersión es la parte del flujo que enlaza al devanado 1, pero no al devanado 2; esto genera una caída de tensión $I_1(jX_1)$, que es proporcional a I_1 y se adelanta a I_1 en 90° . También hay una pérdida de potencia reactiva $I_1^2 X_1$ relacionada con esta reactancia de dispersión. De manera similar, para el devanado 2, hay una resistencia R_2 y una reactancia de dispersión X_2 , que están en serie.

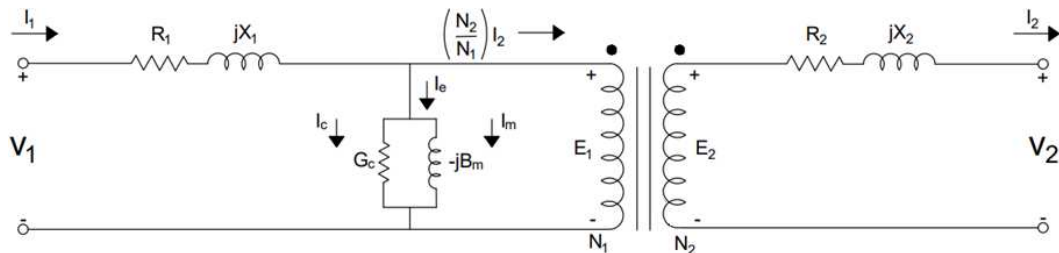


Figura 18 Circuito equivalente de un transformador monofásico práctico de dos devanados.

La ecuación 24 muestra que, al tener una permeabilidad que no es infinita, μ_c , la fmm total no resulta ser cero. Al dividir la ecuación 24 por N_1 y aplicar la ecuación 27, se puede derivar:

$$I_1 - \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{\Re_c \phi_c}{N_1} = \frac{\Re_c}{N_1} \left(\frac{E_1}{j\omega N_1} \right) = -j \left(\frac{\Re_c}{\omega N_1^2} \right) E_1 \quad 36$$

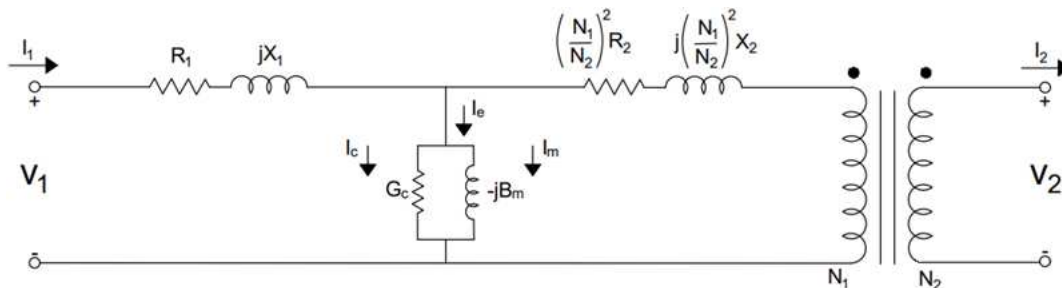
El componente en el lado derecho de la ecuación 36 se denomina **corriente magnetizadora**, I_m . Es claro que I_m está atrás 90° respecto a E_1 y puede ser representada mediante un inductor en paralelo, con una susceptancia $B_m = \left(\frac{\Re_c}{\omega N_1^2} \right)$ mhos*.

No obstante, realmente hay una rama extra en derivación, simbolizada por un resistor con admitancia G_c mhos, que conduce una corriente I_c , conocida como **corriente de pérdida en el núcleo**. I_c está en fase con E_1 . Al considerar la corriente de pérdida en el núcleo, I_c , la ecuación 36 se transforma en:

$$I_1 - \frac{N_2}{N_1} I_2 = I_c + I_m = (G_c - jB_m)E_1 \quad 37$$

Cuando el devanado 2 está desconectado ($I_2 = 0$) y se aplica una tensión senoidal E_1 al devanado 1, la ecuación 37 muestra que la corriente I_1 tendrá dos partes: la corriente de pérdida en el núcleo, I_c , y la corriente magnetizadora, I_m . La corriente I_c está vinculada a una pérdida de potencia real, $I_c^2 / G_c = E_1^2 G_c$ W. Esta pérdida real de potencia representa tanto las pérdidas por histéresis como las pérdidas por corrientes de Eddy en el núcleo. Se producen pérdidas por histéresis porque la variación cíclica del flujo en el núcleo demanda que se libere energía en forma de calor. Por lo tanto, se pueden minimizar las pérdidas por histéresis utilizando aleaciones de acero de alta calidad para el núcleo. Las pérdidas por corrientes de Eddy se generan debido a las corrientes inducidas, conocidas como corrientes de Eddy o corrientes parásitas, que fluyen dentro del núcleo magnético en ángulo recto al flujo. Así, se puede disminuir la pérdida por corrientes parásitas diseñando el núcleo con laminillas de acero de aleación. En relación con I_m , hay una pérdida de potencia reactiva $I_m^2 / B_m = E_1^2 B_m$ var. Esta potencia reactiva es necesaria para magnetizar el núcleo. La combinación de fasores ($I_c + I_m$) se denomina **corriente excitadora**, I_e .

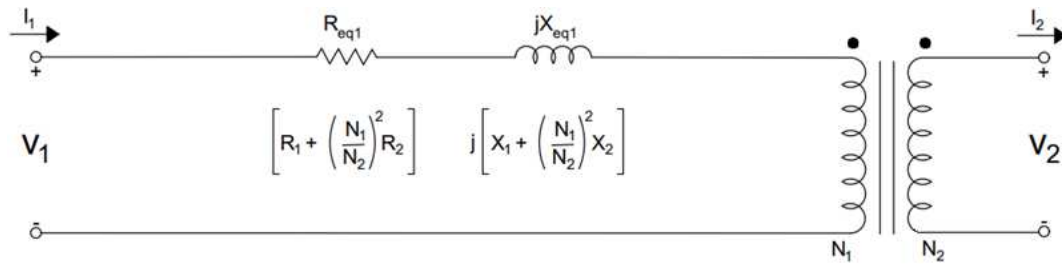
En la figura 19 se presentan tres circuitos equivalentes diferentes para un transformador monofásico con dos devanados. En la Figura 19a, la resistencia R_2 y la reactancia de dispersión X_2 del devanado 2 se relacionan con el devanado 1 usando la ecuación 35. En la figura 19b, se elimina la rama en paralelo, que corresponde a ignorar la corriente excitadora. Dado que esta corriente generalmente es inferior al 5% de la corriente nominal, a menudo se considera aceptable ignorarla en los análisis de sistemas de potencia, salvo en casos donde la eficiencia del transformador o los efectos de la corriente excitadora sean de especial relevancia. Para transformadores de potencia grandes, con capacidades que superan los 500 KVA, suele ser posible desestimar las resistencias de los devanados, ya que son pequeñas en comparación con las reactancias de dispersión, como indica la figura 19c.



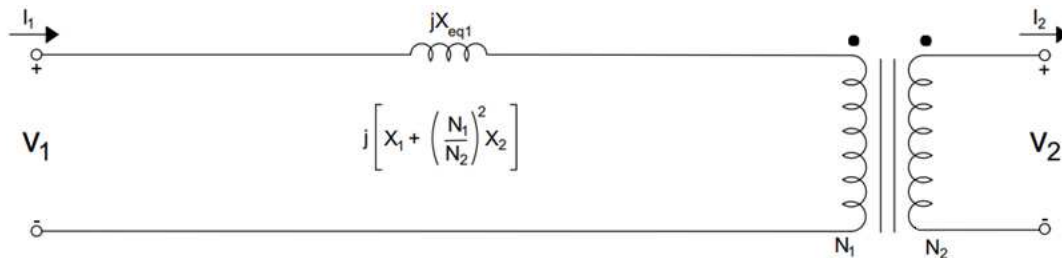
a) R_2 y X_2 están referidas al devanado 1.

Figura 19 Circuitos equivalentes para un transformador monofásico práctico de dos devanados.

*Las unidades de la admitancia, la conductancia y la susceptancia, que en el sistema SI son los siemens (con símbolo S), también se llaman mhos (con símbolo $\mathcal{U}$) u ohms⁻¹ (con símbolo Ω^{-1}).



b) Despreciando la corriente excitadora.



c) Despreciando la corriente excitadora y la pérdida I^2R en el devanado.

Continuación de la figura 19.

1.8 Análisis de la regulación de tensión con diferentes tipos de cargas

La carga en un gran transformador de potencia, dentro de una subestación, a menudo cambia desde niveles muy bajos por la mañana hasta alcanzar cifras muy altas en los momentos de máxima actividad comercial e industrial. El voltaje en el lado secundario de un transformador experimentará ligeras variaciones según la carga. Dado que los motores y los sistemas de calefacción son bastante sensibles a las fluctuaciones del voltaje, es crucial regular adecuadamente el transformador. La tensión secundaria también se ve afectada por el tipo de factor de potencia de la carga, ya sea adelantado, atrasado o igual a uno. Por lo tanto, es esencial entender cómo reaccionará el transformador ante cargas capacitivas, inductivas o resistivas.

Si un transformador fuese ideal, sus bobinas no presentarían ninguna impedancia. Además, no necesitaría potencia reactiva para generar el campo magnético en su interior. Este transformador tendría una regulación perfecta sin importar las condiciones de carga, y el voltaje en el lado secundario se mantendría totalmente constante. No obstante, los transformadores que existen en la realidad tienen algo de reactancia en sus bobinas y requieren potencia reactiva para crear sus campos magnéticos. Por lo tanto, tanto los devanados del primario como del secundario contienen una resistencia R y una reactancia X . El circuito equivalente de un transformador se puede ilustrar de manera aproximada con el circuito que se muestra en la figura 20. Las terminales reales del transformador son P_1 y P_2 en el primario, así como S_1 y S_2 en el secundario. Se asume que el transformador ubicado entre estas terminales es un transformador “ideal” en serie que presenta una resistencia R y otras imperfecciones reflejadas por X . Es claro que si el voltaje del primario E_1 se mantiene fijo, el voltaje del secundario E_2 cambiará con la carga a causa de R y X .

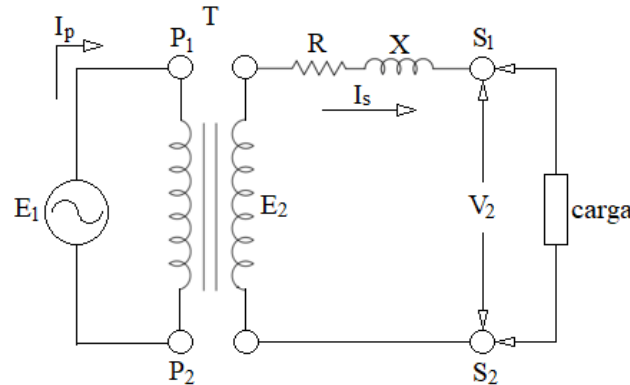


Figura 20 Circuito equivalente de un transformador “perfecto o ideal” de un transformador (aproximación).

La resistencia y la reactancia inductiva de los devanados generan caídas internas que cambian según la corriente que pasa por ellos. Cuando el devanado secundario tiene poca carga, la corriente I_2 en la impedancia del devanado es baja, así como las pérdidas de potencia internas. A medida que se incrementa la carga, tanto la corriente I_2 como las pérdidas de potencia internas crecen.

La carga que se encuentra en el devanado secundario influye de manera importante en la regulación del transformador. Cuando la carga es resistiva, la corriente I_2 y el voltaje V_2 están en fase. Esto minimiza el ángulo de fase entre el voltaje inducido E_2 (o voltaje interno E_2) y la corriente del devanado secundario I_2 , acercándose más a estar en fase. A medida que la carga crece, la corriente I_2 también aumenta, lo que resulta en un ángulo de fase más pequeño entre el voltaje inducido E_2 y la corriente I_2 . Si se incrementa la carga resistiva, el voltaje V_2 se reduce mientras que la corriente I_2 se eleva.

Una carga inductiva incrementa la reactancia inductiva en el circuito secundario. Las fluctuaciones en el voltaje y la corriente con una carga inductiva son más grandes que las que se observan con una carga resistiva similar.

Una carga capacitiva agrega reactancia capacitiva que se coloca en serie con la reactancia inductiva del devanado secundario. Esta unión forma un circuito LC en serie. El voltaje E_2 que se induce en el devanado secundario se conecta en serie a la reactancia inductiva del mismo devanado y a la reactancia capacitiva de la carga. Los voltajes en los componentes reactivos cambian según la frecuencia y el valor de cada componente. La reactancia capacitiva disminuye a medida que aumenta la frecuencia y la capacitancia ($X_C = 1/(2 \pi f C)$) por lo que cuando la reactancia capacitiva es alta, el voltaje en la carga capacitiva supera al voltaje en la reactancia inductiva del devanado secundario. Si la reactancia capacitiva se reduce, el circuito se acerca a una condición resonante, lo que provoca un aumento en los voltajes a través de las reactancias; si ambas reactancias son iguales, entonces los voltajes reactivos alcanzan su máximo y son equivalentes.

El % regulación de tensión para un transformador se define a través de la ecuación 38. Esta ecuación se utiliza en el primario y en el secundario.

$$\% \text{ reg ten} = \left(\frac{E_0 - E}{E_0} \right) 100 \quad 38$$

Para el primario:

E_0 Voltaje nominal del primario

E Voltaje aplicado al primario

Para el secundario:

E_0 Voltaje nominal del secundario

E Voltaje aplicado a la carga

1.9 Eficiencia de los transformadores a diferentes factores de potencia

Una vez resuelto el circuito equivalente de la figura 18 se calculan pérdidas en las impedancias (ver el **complemento: Práctica 2 Objetivo 5**) lo que permite calcular la eficiencia del transformador. La eficiencia del transformador se define usando la ecuación 39.

$$\sigma = \frac{P_s}{P_e} 100 \quad 39$$

donde

P_s Potencia de salida (potencia entregada a la carga)

P_e Potencia de entrada (potencia entregada al primario del transformador)

1.10 Autotransformadores monofásicos

Hay un tipo particular de transformador que cuenta con un solo devanado. Sin embargo, desde una perspectiva funcional, ese devanado funciona tanto como primario como secundario. Este tipo de transformador se llama autotransformador. Al usar un autotransformador para aumentar el voltaje, una sección del devanado desempeña el papel de primario mientras que todo el devanado opera como secundario. Por otro lado, cuando un autotransformador se utiliza para disminuir el voltaje, el devanado completo actúa como primario y una parte de este realiza la función de secundario.

En las ilustraciones 21a y 21b, se presentan autotransformadores que están conectados de manera que pueden aumentar o disminuir el voltaje.

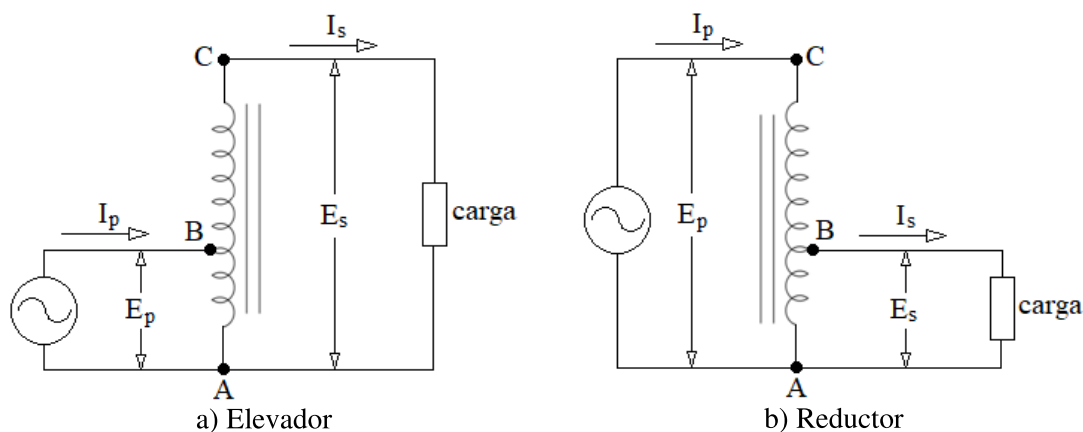


Figura 21 El autotransformador.

La operación del autotransformador es esencialmente idéntica a la de un transformador tradicional con dos bobinas. La energía se transfiere del devanado primario al secundario a través de un campo magnético que cambia, y el devanado secundario, a su vez, regula la corriente en el primario para lograr que ambas potencias sean iguales en los devanados primario y secundario. Cuánto se reduce

o se multiplica el voltaje depende de la relación entre la cantidad de vueltas del primario y las del secundario, considerando cada bobina por separado, sin tener en cuenta que algunas vueltas son compartidas por ambos devanados.

Las tensiones y corrientes de diferentes bobinados pueden calcularse siguiendo dos normas básicas:

1 La potencia aparente en el primario es igual a la del secundario (ecuación 40).

$$E_p I_p = E_s I_s \quad 40$$

2 La tensión en el primario (fuente) y en el secundario (carga) se relaciona directamente con la cantidad de vueltas N (ecuación 41).

$$E_p / E_s = N_p / N_s \quad 41$$

Por lo tanto, para la figura 21a se tiene:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_{A \text{ a } B}}{N_{A \text{ a } B} + N_{B \text{ a } C}} = \frac{N_{A \text{ a } B}}{N_{A \text{ a } C}} \quad 42$$

Y, para la figura 21b se tiene:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_{A \text{ a } B} + N_{B \text{ a } C}}{N_{A \text{ a } B}} = \frac{N_{A \text{ a } C}}{N_{A \text{ a } B}} \quad 43$$

Las ecuaciones 42 y 43 se basan en un aspecto clave: los voltajes $E_{A \text{ a } B}$ y $E_{B \text{ a } C}$ se suman en la misma dirección y no se oponen entre sí. Se ha considerado que los voltajes están en fase.

Claro está, la cantidad de corriente que fluye no debe exceder la capacidad de corriente del devanado. Con esta información, calcular la carga VA que un transformador específico puede ofrecer es bastante sencillo.

Una desventaja del autotransformador es la falta de aislamiento entre los circuitos primario y secundario, ya que comparten algunas vueltas en común.

El autotransformador, porque tiene menos pérdidas de núcleo y de cobre es algo más eficiente que los transformadores que tienen los devanados separados. Se usa principalmente donde se requieren más o menos pequeños aumentos o disminuciones de voltaje; por ejemplo, para elevar el voltaje de la línea de potencia para compensar las pérdidas que hayan sido causadas por líneas largas de transmisión, o para reducir los voltaje de arranque del motor, y así, manteniendo a valores razonables las corrientes de arranque. En las aplicaciones industriales donde se requieren varios voltajes para sistemas de circuito complejos, se usaría un autotransformador con tomas múltiples. La desventaja principal del autotransformador es la ausencia de aislamiento entre los devanados. Por lo general, no es aconsejable usarlo como un gran dispositivo reductor, porque si la sección de bajo voltaje del devanado se abriera, el alto voltaje de entrada se suministraría a través de la carga de bajo voltaje.

1.11 Conexiones de transformadores monofásicos en arreglos trifásicos

Un transformador trifásico puede consistir en un único transformador o también estar formado por tres transformadores monofásicos que se conectan en forma de delta o estrella. En ciertos casos, se utilizan únicamente dos transformadores.

El voltaje en las líneas de potencia trifásicas suele ser de 208V, mientras que los valores estándar de voltaje monofásico son de 120V, los cuales se pueden obtener como se muestra en la figura 22. Los devanados *a*, *b* y *c* representan los tres secundarios del transformador que están dispuestos en estrella. Las líneas trifásicas están marcadas con las letras *A*, *B* y *C*, y las conexiones monofásicas se realizan desde *A*, *B* y *C* hacia el neutro (tierra, *N*). Para que los transformadores trifásicos funcionen correctamente, deben conectarse adecuadamente a las líneas. En la figura 23 se presentan los cuatro tipos de conexión más comunes. De estas combinaciones, la más utilizada es la última, que es la conexión Δ - Y .

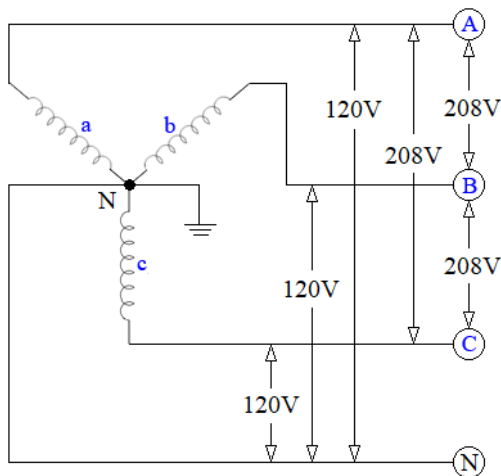


Figura 22 Voltaje trifásico de las líneas de potencia.

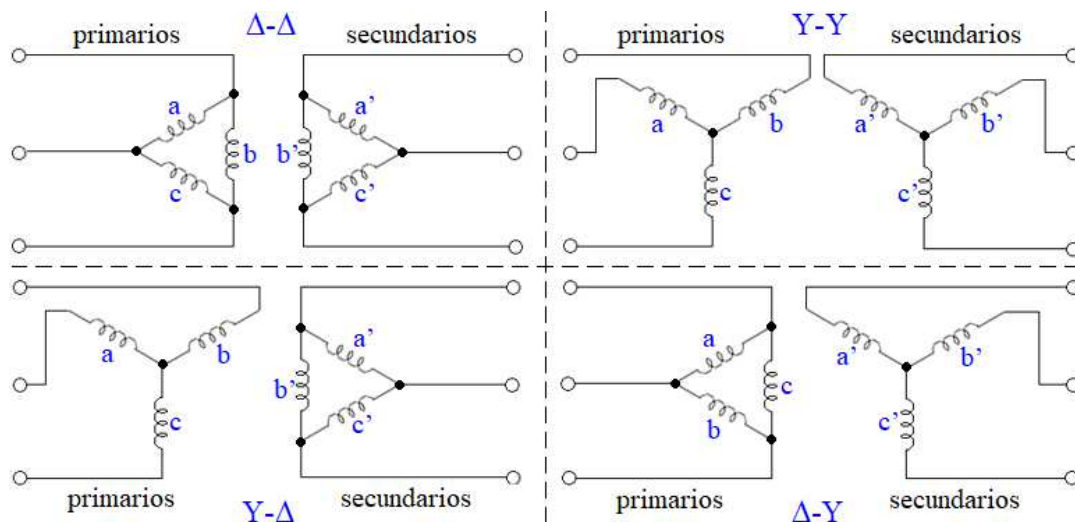


Figura 23 4 tipos de conexión más usados en transformadores trifásicos.

Independientemente del método de conexión que se elija, es vital que los devanados se unan de manera que mantengan las relaciones de fase adecuadas. Para encontrarlas en un devanado secundario que está en estrella, se mide el voltaje entre dos devanados, como se muestra en la figura 24a. El voltaje entre **A** y **B** debe ser igual a $\sqrt{3}$ veces el voltaje que se presenta en cualquiera de los dos devanados. Si el voltaje entre **A** y **B** coincide con el de uno de los devanados, entonces es necesario invertir uno de ellos. A continuación, el tercer devanado, **C**, se une de la manera que se indica en la figura 24b, y el voltaje entre **C** y **A** o **B** también tiene que ser igual a $\sqrt{3}$ veces el voltaje de cualquiera de los devanados. Si esto no se cumple, se deberá invertir el devanado **C**.

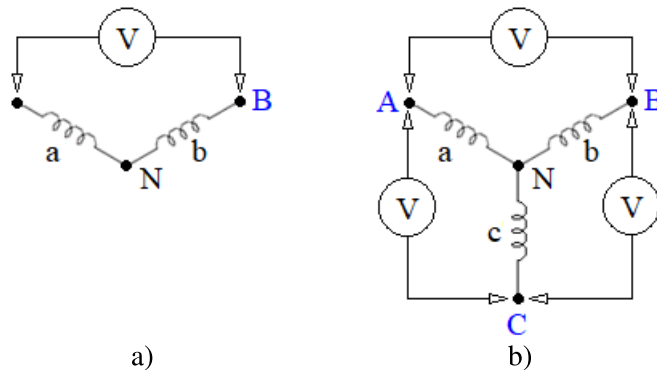


Figura 24 Secundario conectado en estrella.

Para identificar las relaciones de fase correctas en un secundario que está conectado en delta, se mide el voltaje en los dos devanados, como se ilustra en la figura 25a. El voltaje entre **A** y **C** debe coincidir con el voltaje de cualquiera de los dos devanados. Si esto no ocurre, uno de los devanados necesita ser invertido. Después, el devanado **C** se conecta de la manera mostrada en la figura 25b, y el voltaje entre los tres devanados desde **C'** hasta **C** debe ser cero. Si no se cumple esto, se debe invertir el devanado **C**. Posteriormente, se conectan las terminales abiertas (**C'** y **C**), y en este punto, el transformador tendrá las relaciones de fase correctas para la conexión en delta, tal como se muestra en la figura 25c.

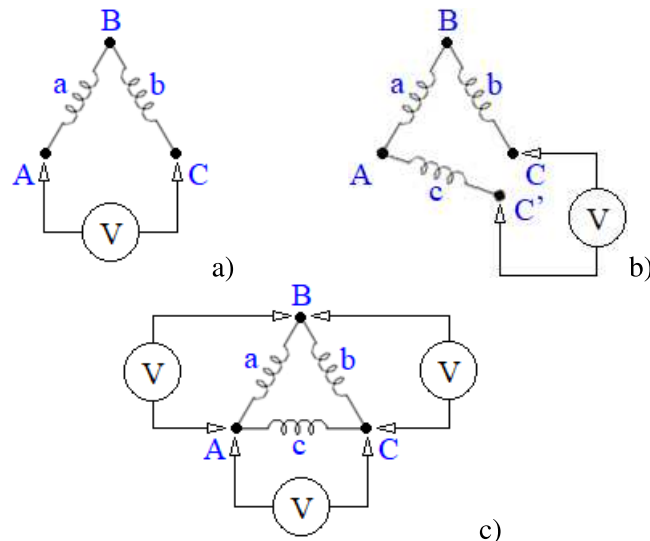


Figura 25 Secundario conectado en estrella.

En una conexión $Y-Y$, la relación de vueltas entre el devanado primario y el secundario es igual a la de un transformador monofásico independiente. El voltaje de salida en la conexión $\Delta-\Delta$ también se relaciona con la proporción de vueltas entre los devanados primario y secundario. Por otro lado, la conexión $\Delta-Y$ tiene una relación de voltaje trifásico más alta que las otras configuraciones, como $Y-Y$ y $\Delta-\Delta$. Esto sucede porque el voltaje entre dos devanados del secundario conectados en estrella es equivalente a $\sqrt{3}$ veces el voltaje que se mide de línea a neutro. En contraste, la conexión $Y-\Delta$ es inversa a la conexión $\Delta-Y$.

1.12 Conexiones de autotransformadores monofásicos en arreglos trifásicos

La figura 26 muestra la conexión de autotransformadores monofásicos en arreglos trifásicos como elevador y como reductor.

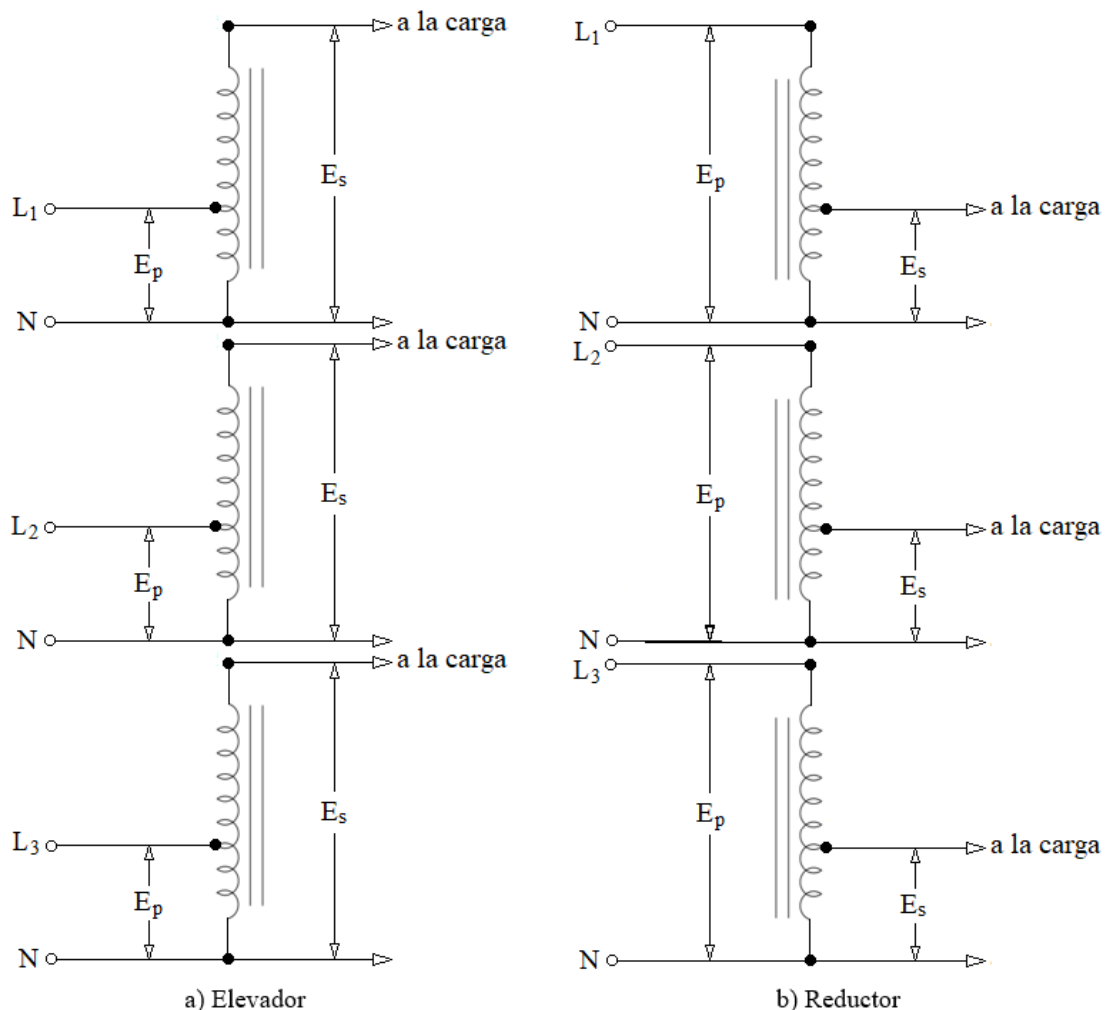
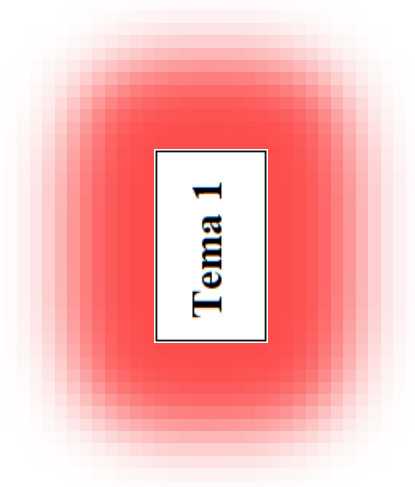


Figura 26 Conexión de autotransformadores monofásicos en arreglos trifásicos como elevador y como reductor.



Complementos educativos



Tema 1

Aprendizaje basado en problemas

Referencias:

Diseño del complemento:

Problema 1 y 2

“**Tema 1**” de la asignatura “**Máquinas Eléctricas**”

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Diseño del complemento:

Problema 3

“**Tema 1**” de la asignatura “**Máquinas Eléctricas**”

POWER SYSTEM, ANALYSIS & DESIGN,

J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, Thomas J. Oberbye

Cengage Learning

ISBN-13: 978-1-111-42579-1, ISBN-10: 1-111-42579-5

Problema 1 Cálculo de la velocidad de las partículas libres dentro de un conductor (velocidad de arrastre)

La velocidad de las partículas libres dentro de un conductor “velocidad de arrastre” se calcula empleando la ecuación **i**_[1].

$$v_d = \frac{J}{nq_e} \quad \textbf{i}$$

donde:

v_d velocidad de arrastre de las partículas libres (m/s)
 J densidad de corriente (A/m²)
 n densidad de átomos por unidad de volumen (átomos/m³)
 q_e carga del electrón (1.60218X10⁻¹⁹ C)

n se calcula usando la ecuación **ii**.

$$n = \frac{N_A \rho_m}{M} \quad \textbf{ii}$$

donde:

N_A constante de Avogadro (6.03X10²³ átomos/mol)
 ρ_m densidad del material (Kg/m³)
 M masa molar del material (Kg/mol)

^[1]*FÍSICA VOLUMEN 2*

David Halliday, Robert Resnick, Kenneth S. Krane
Compañía Editorial Continental, S.A de C.V México
ISBN 0-471-54804-9

La tabla **i** muestra un fragmento del código eléctrico nacional, el cual fija las corrientes máximas seguras o no peligrosas para alambres de Cu aislados con hule.

Tabla **i** Fragmento del código eléctrico nacional.

Calibre ^a	Diámetro in	Diámetro mm	Diámetro mils	Área CM	Área mm ²	Kilos (Kg) por 1000m	Carga en amperes (I) A
18	0.0403	1.024	40.3	1524.09	0.823	7.32	3
19	0.0359	0.912	35.9	1288.81	0.653	5.8	2.25
20	0.032	0.813	32	1024	0.5189	4.6	2

^a una manera de identificar el diámetro del alambre

40 calibres

Para corrientes superiores que las indicadas en la tabla **i** el conductor disipa más potencia lo que implicaría su destrucción.

Problema a Calcule la velocidad de arrastre, V_d , para un conductor de cobre (Cu) calibre 19 considerando corrientes de 1, 2.25 y 3A.

Solución:

La tabla **i** muestra que la velocidad se triplica si la corriente se triplica.

Tabla **i** Cálculo de la velocidad de arrastre para un conductor de Cu calibre 19.

ρ_m	M	M	n	e^- libres		n		
Kg/m ³	gr/mol	Kg/mol	átomos/m ³	1		e^-/m^3		
8960	63.545644	0.063545644	8.50236E+28			8.50236E+28		
	Código							
I	D	D	A	J	Vd	Vd	Vd	Vd
A	in	mm	m ²	A/m ²	m/s	cm/s	cm/h	mm/s
1	0.0359	0.91186	6.5305E-07	1531277.102	1.12E-04	0.011240948	40.46741344	0.112409482
I								
A								
2.25				3445373.479	2.53E-04	0.025292133	91.05168024	0.252921334
I								
A								
3				4593831.305	3.37E-04	0.033722845	121.4022403	0.337228445

Problema b Calcule la corriente máxima segura I para alambres de plata (Ag), aluminio (Al) y oro (Au) para el calibre 19. Considere la tabla **i** como referencia.

Solución:

La tabla **ii** muestra la propuesta para calcular la corriente máxima segura I para alambres de Ag, Al y Au para el calibre 19.

Tabla **ii** Propuesta para calcular la corriente máxima segura I para alambre de Ag, Al y Au para el calibre 19.

Material	ρ_m	M	M	n	e^- libres	n	factor
	Kg/m ³	gr/mol	Kg/mol	átomos/m ³		e^-/m^3	
Cu	8960	63.545644	0.063545644	8.50236E+28	1	8.50236E+28	1
Ag	10490	107.868151	0.107868151	5.86408E+28	1	5.86408E+28	1.449906412
Al	2700	26.981538	0.026981538	6.03413E+28	3	1.81024E+29	0.46968199
Au	19300	196.966552	0.196966552	5.90857E+28	1	5.90857E+28	1.438988747

Calibre				
19	Código			
I_{cu}	D	D	A	J
A	in	mm	m ²	A/m ²
2.25	0.0359	0.91186	6.5305E-07	3445373.479
Vd	factor	Material	I	
cm/h			A	
91.05168024	1	Cu	2.25	
132.016415	1.449906412	Ag	3.262289427	
42.76533433	0.46968199	Al	1.056784477	
131.0223433	1.438988747	Au	3.23772468	
Independientemente del calibre, el factor no cambia.				
Es posible calcular el factor usando n o la Vd.				

La velocidad de los electrones en la plata es mayor que la velocidad de arrastre de los electrones en el cobre, aún, cuando por los alambres fluye la misma corriente. Esto es, un número más pequeño de portadores de carga debe moverse más rápidamente en la plata, en consecuencia la red se desplaza más rápidamente. El mejor metal conductor es la plata, le siguen el oro, el cobre y el aluminio.

Problema 2 Análisis de la ley de Faraday y Ley de Lenz

Parte a)

Problema a Hallar el sentido de la corriente inducida (corriente convencional) en la espira para el observador “P” (figura i).

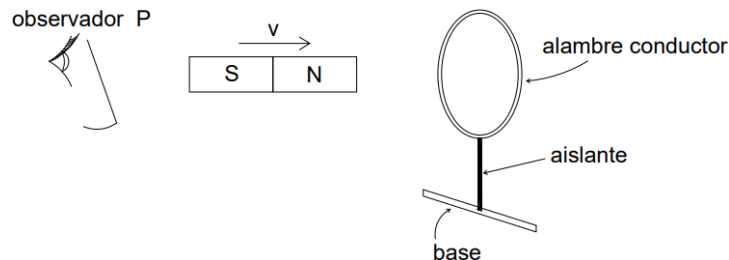


Figura i Problema a.

Solución:

La bobina “ve” un campo magnético que aumenta, lo que implica que las líneas del flujo exterior y las líneas del flujo inducido tienen sentidos contrarios (figura i).

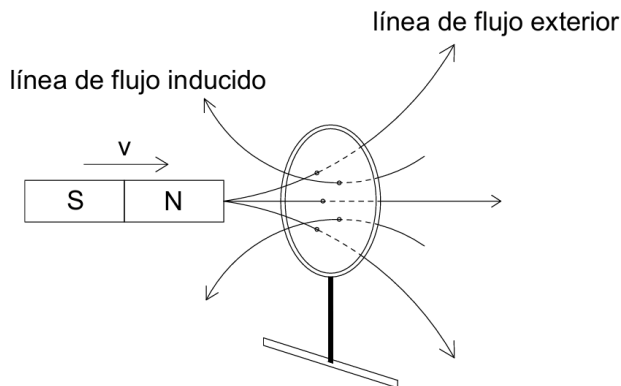


Figura *i* Caso a. Cuando el flujo magnético (ϕ_{ext}) sobre la espira “aumenta”.

El sentido de la corriente se halla con la regla de la mano derecha y con referencia a las líneas del flujo inducido, por lo tanto el sentido de la corriente inducida convencional es: antihorario (figura *ii*).

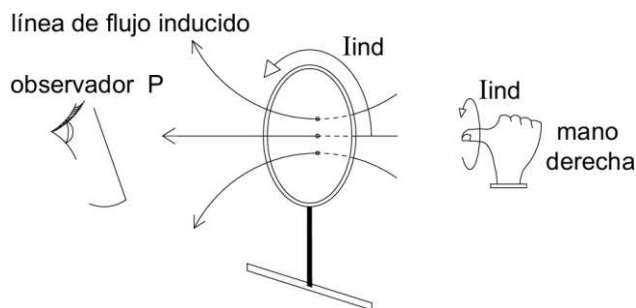


Figura *ii* El sentido de la corriente inducida convencional es: antihorario.

Problema b Un imán de barra descende acercándose a una espira conductora fija (figura *ii*). Para el observador mostrado, ¿Cómo circula la corriente inducida (corriente real) en la espira?

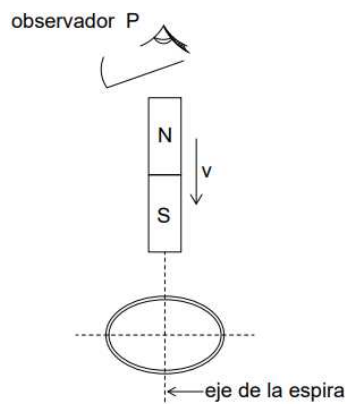


Figura *ii* Problema b.

Solución:

La bobina “ve” un campo magnético que aumenta, lo que implica que las líneas del flujo exterior y las líneas del flujo inducido tienen sentidos contrarios (figura *iii*).

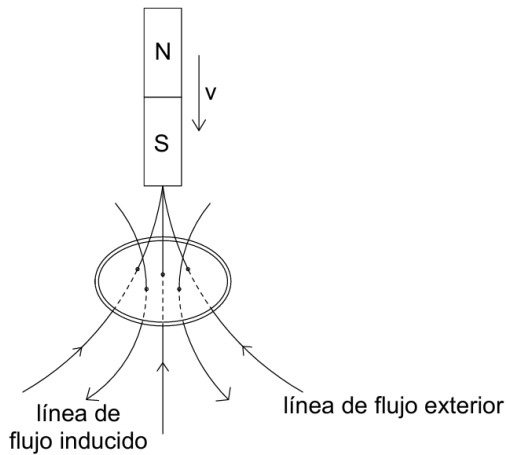


Figura [iii](#) Caso a. Cuando el flujo magnético (ϕ_{ext}) sobre la espira “aumenta”.

El sentido de la corriente inducida real es: antihorario (figura [iv](#)).

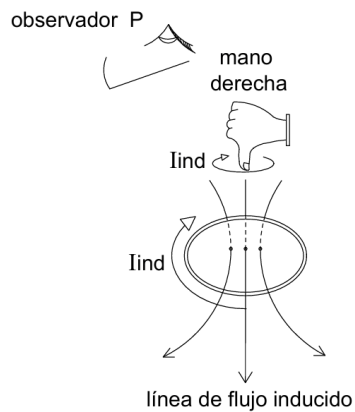


Figura [iv](#) El sentido de la corriente inducida real es: antihorario.

Problema c Determine el sentido de la corriente inducida (corriente convencional) en la espira conductora, para el observador que se muestra (figura [iii](#)).

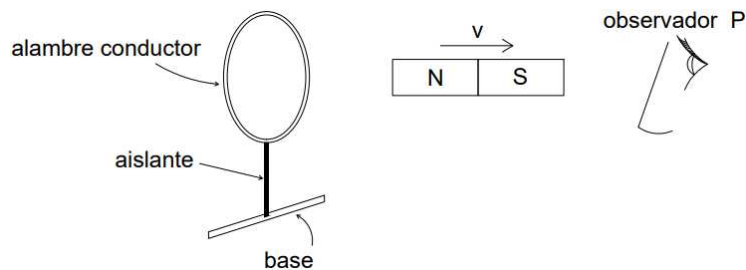


Figura [iii](#) Problema c.

Solución:

La bobina “ve” un campo magnético que disminuye, lo que implica que las líneas del flujo exterior y las líneas del flujo inducido tienen el mismo sentido (figura [v](#)).

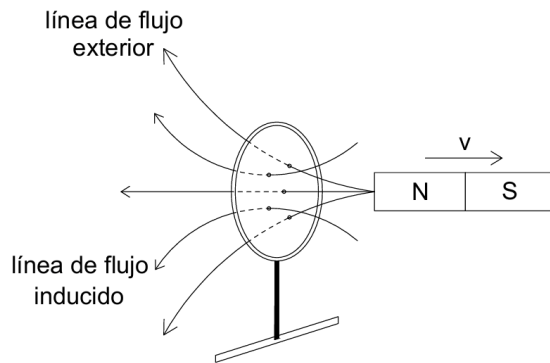


Figura v Caso b. Cuando el flujo magnético (ϕ_{ext}) sobre la espira “disminuye”.

El sentido de la corriente inducida convencional es: horario (figura vi).

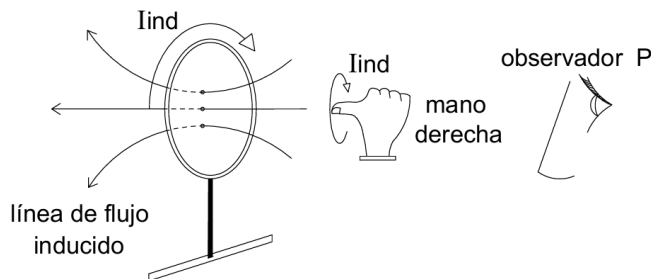


Figura vi El sentido de la corriente inducida convencional es: horario.

Parte b)

Problema a Una espira de sección circular está en el campo magnético de intensidad variable, formando el vector asociado a la superficie un ángulo de 30° con el vector inducción. Si el flujo magnético a través de la espira cambia de $4 \times 10^{-5} \text{ wb}$ a $10 \times 10^{-5} \text{ wb}$ en 0.01 s , ¿Cuál es el valor medio de la fem inducida?

Solución:

Usando la ecuación 8, se tiene que la fuerza electromotriz inducida es:

N	ϕ_{m2}	ϕ_{m1}	$\Delta\phi_m$	t_2	t_1	Δt	E_{ind}
vuelatas			$\phi_{m2} - \phi_{m1}$			$t_2 - t_1$	
1	Wb	Wb	Wb	s	s	s	V
	1.00E-04	4.00E-05	6.00E-05	0.01	0	0.01	-0.006

Problema b En el interior de un campo magnético de 0.2 mT , un circuito como el de la figura iv, cuyo brazo móvil es de 10 cm de longitud, se desplaza hacia la izquierda a una velocidad de 5 cm/s .

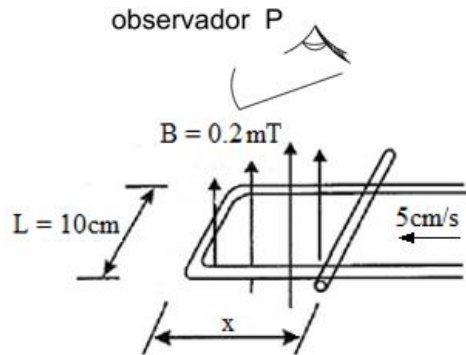


Figura iv Fuerza electromotriz inducida en el circuito.

- i) Si el campo magnético es perpendicular a la superficie del circuito. ¿Cuál es el valor de la fem que induce el circuito?
- ii) Determine el sentido de la corriente inducida (corriente convencional) en la espira conductora, para el observador que se muestra en la figura iv.

Solución:

i)

Usando la ecuación la ecuación 1, se tiene:

$$\phi_m = B A = BLx$$

Para dos instantes (1) y (2) cualquiera, se tiene:

$$\phi_{m2} = BLx_2 \quad \phi_{m1} = BLx_1$$

L y B son constantes mientras que x varía con el tiempo, por lo tanto la fem inducida es:

$$E_{ind} = -\frac{\Delta\phi_m}{\Delta t} = -\frac{BL(x_2 - x_1)}{t_2 - t_1}$$

Como $\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = v$ es la velocidad de la barra entonces:

$$E_{ind} = -BLv$$

Usando el resultado anterior la fuerza electromotriz inducida es:

B	L	v	E_{ind}
T	m	m/s	V
2.00E-04	0.1	0.05	-1.00E-06

ii)

La bobina “ve” un campo magnético que disminuye, lo que implica que las líneas del flujo exterior y las líneas del flujo inducido tienen el mismo sentido por lo que el sentido de la corriente inducida convencional es: anti horario.

Problema c Una bobina de 25 espiras de radio 3cm es atravesada perpendicularmente a su sección por un campo magnético externo que aumenta de 2 a 35T en 0.01s. Si la resistencia eléctrica de la bobina es de 1.5Ω , ¿de qué magnitud será la intensidad de la corriente inducida?

Solución:

Usando la ecuación 8 y la ley de Ohm la corriente inducida es:

N	r	A	B ₂	B ₁	Φ_{m2}	Φ_{m1}	$\Delta\Phi_m$
vueltas	m	m ²	T	T	Wb	Wb	$\Phi_{m2} - \Phi_{m1}$
25	0.03	0.00282743	35	2	9.90E-02	5.65E-03	9.33E-02

t ₂	t ₁	Δt	E _{ind}	R	I _{ind}
		t ₂ -t ₁			
s	s	s	V	Ω	A
0.01	0	0.01	-233.263255	1.5	-155.508836

Problema d Una espira cuadrada de 0.4m de lado se ubica perpendicularmente a un campo magnético uniforme de 5mT, la resistencia de esta espira es 2Ω . Halle la corriente inducida en la espira cuando desaparece el campo magnético demorándose 0.2s.

Solución:

El flujo magnético inicial es:

$$\Phi_{mo} = B A = 8E^{-4}wb$$

El flujo magnético final es $\Phi_{mf} = 0wb$, puesto que el campo magnético desaparece.

Usando la ecuación 3 y la ley de Ohm la corriente inducida es:

N	L	A	$\Delta\Phi_m$	t ₂	t ₁	Δt	E _{ind}	R	I _{ind}
			$\Phi_f - \Phi_o$			t ₂ -t ₁			
vueltas	m	m ²	Wb	s	s	s	V	Ω	A
1	0.4	0.16	-8.00E-04	0.2	0	0.2	-4.00E-03	2	-0.002

En las respuestas de los problemas **a)** y **b)** el signo negativo indica que se trata de un voltaje inducido y en los problemas **c)** y **d)** el signo negativo indica que se trata de una corriente inducida.

Problema 3 Análisis del transformador ideal y real

Problema a Transformador monofásico ideal de dos devanados. La capacidad nominal de un transformador monofásico de dos devanados es de 20KVA, 480/120V, 60Hz. Una fuente conectada al devanado de 480V alimenta una carga conectada al devanado de 120V. La carga

absorbe 15KVA con un factor de potencia de 0.8 atrasado, cuando la tensión que se le aplica 118V. Suponga que el transformador es ideal y calcule lo siguiente:

- i) La tensión aplicada al devanado de 480V.
- ii) La impedancia de la carga.
- iii) La impedancia de la carga referida al devanado de 480V y
- iv) La potencia real y reactiva suministrada al devanado de 480V.

Solución:

i)

La tensión en la carga se considerará como referencia.

$$\mathbf{E}_2 = 118\angle 0^\circ \text{ V}$$

Usando la ecuación 27 la relación de transformación a_t es:

$$a_t = \frac{E_1}{E_2} = \frac{480}{120} = 4$$

Por lo tanto la tensión en el primario es:

$$\mathbf{E}_1 = 472\angle 0^\circ \text{ V}$$

Observe como la tensión $\mathbf{E}_1$ y la tensión $\mathbf{E}_2$ están en fase.

ii)

La potencia absorbida por la carga es:

$$\mathbf{S}_2 = \mathbf{E}_2 \mathbf{I}_2^* = 15000\angle \cos^{-1}(0.8) \text{ VA}$$

La corriente en la carga es:

$$\mathbf{I}_2 = 127.118\angle 36.869^\circ \text{ A}$$

Por lo que la impedancia de la carga es:

$$\mathbf{Z}_2 = \frac{\mathbf{E}_2}{\mathbf{I}_2} = 0.928\angle 38.869^\circ \Omega$$

iii)

$$\mathbf{Z}'_2 = a_t^2 \mathbf{Z}_2 = 14.852\angle 38.869^\circ \Omega$$

iv)

Para un transformador ideal $S_1 = S_2$, por lo que:

$$S_1 = 15000 \angle 36.869^\circ = 12000 + j9000 \text{ VA}$$

Problema b Pruebas de cortocircuito y de circuito abierto del transformador. La capacidad nominal de un transformador monofásico de dos devanados es de 20KVA, 480/120V, 60Hz. Durante una prueba de cortocircuito (figura v), en donde se aplica la corriente nominal a la frecuencia nominal al devanado de 480V (denotado como devanado 1), con el devanado de 120V (devanado 2) en cortocircuito, se obtienen las lecturas siguientes: $E_1 = 35\text{V}$, $P_1 = 300\text{W}$. Durante una prueba de circuito abierto (figura vi), en donde se aplica la tensión nominal al devanado 2, con el devanado 1 abierto, se obtienen las lecturas siguientes: $I_2 = 12\text{A}$, $P_2 = 200\text{W}$.

- A partir de la prueba de corto circuito, determine la impedancia equivalente en serie, $Z_{eq1} = R_{eq1} + jX_{eq1}$. Desprecie la admitancia en derivación.
- A partir de la prueba de circuito abierto, determine la admitancia en derivación, $Y_m = G_c - jB_m$. Desprecie la impedancia en serie.

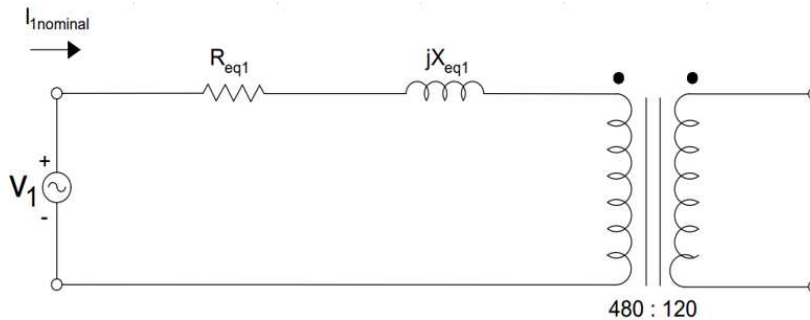


Figura v Prueba de cortocircuito (despreciando la admitancia en derivación).

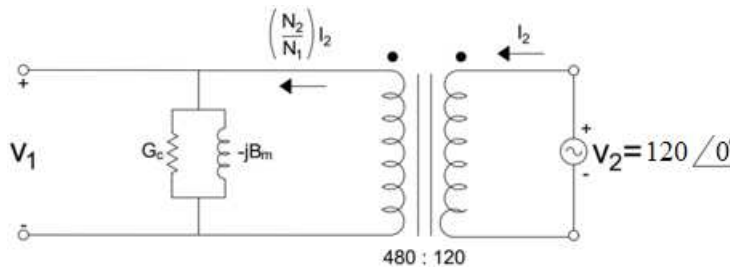


Figura vi Prueba de circuito abierto (despreciando la impedancia en serie).

Solución:

i)

En la figura v se muestra el circuito equivalente para la prueba de cortocircuito, en donde se desprecia la rama de admitancia en derivación. La corriente nominal para el devanado 1 es:

$$I_{1\text{nominal}} = \frac{S_{\text{nominal}}}{E_{1\text{nominal}}} = \frac{20000}{480} = 41.666 \text{ A}$$

Entonces, se determina R_{eq1} , Z_{eq1} y X_{eq1} .

$$R_{eq1} = \frac{P_1}{I_{1\text{nominal}}^2} = \frac{300}{41.666^2} = 0.172\Omega$$

$$|Z_{eq1}| = \frac{V_1}{I_{1\text{nominal}}} = \frac{35}{41.666} = 0.840\Omega$$

$$X_{eq1} = \sqrt{Z_{eq1}^2 - R_{eq1}^2} = 0.822\Omega$$

Por lo tanto:

$$Z_{eq1} = R_{eq1} + iX_{eq1} = 0.172 + i0.822\Omega$$

ii)

En la figura vi se muestra el circuito equivalente para la prueba de circuito abierto, en donde se desprecia la impedancia en serie.

Usando la ecuación 32 se tiene:

$$E_1 = \frac{N_1}{N_2} E_2 = a_t E_2 = \frac{480}{120} 120 = 480V$$

Entonces, se determina G_c , Y_m y B_m .

$$G_c = \frac{P_2}{V_1^2} = \frac{200}{480^2} = 0.000868\Omega^{-1}$$

$$|Y_m| = \frac{\left(\frac{N_2}{N_1}\right) I_2}{V_1} = \frac{\left(\frac{120}{480}\right) 12}{480} = 0.00625\Omega^{-1}$$

$$B_m = \sqrt{Y_m^2 - G_c^2} = 0.00618\Omega^{-1}$$

Por lo tanto:

$$Y_m = G_c - iB_m = 0.000868 - i0.00618\Omega^{-1}$$

Es importante notar que, para calcular la impedancia equivalente en serie, normalmente se utiliza la corriente nominal a partir de una prueba de cortocircuito, mientras que la admitancia en derivación se obtiene a partir de una prueba de circuito abierto usando la tensión nominal. Cuando el transformador funciona alrededor de las condiciones nominales, los valores de impedancia y admitancia generalmente se consideran fijos, incluso con pequeñas variaciones.

Aprendizaje basado en retos

Referencia:

Diseño del complemento:

Reto 1 y 2

“Tema 1” de la asignatura **“Máquinas Eléctricas”**

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Cualquier herramienta computacional se diseña en términos de un modelo matemático. La frase “construcción de la herramienta computacional” se refiere que el profesor debe proponer el modelo matemático en análisis y posteriormente el estudiante construye la herramienta computacional, obviamente el profesor revisa y corrige (si hubiera errores) el trabajo del estudiante hasta que concreta lo que el profesor ha definido como final.

Reto 1 Construcción de la herramienta computacional “a) corriente alterna y b) solución del circuito resistivo-inductivo-capacitivo excitado con corriente alterna”

a) Corriente alterna

Esta herramienta computacional considera el tiempo y permite explicar las características principales de la corriente alterna: periodo, frecuencia, amplitud y velocidad angular. El diagrama fasorial muestra el fasor $\mathbf{I}$ y sus componentes empleando el valor máximo y los gráficos en función del tiempo muestran $i(t)$ y el valor instantáneo de la función, β permite desplazar la función $i(t)$ (figuras [vii](#), [viii](#) y [ix](#)).

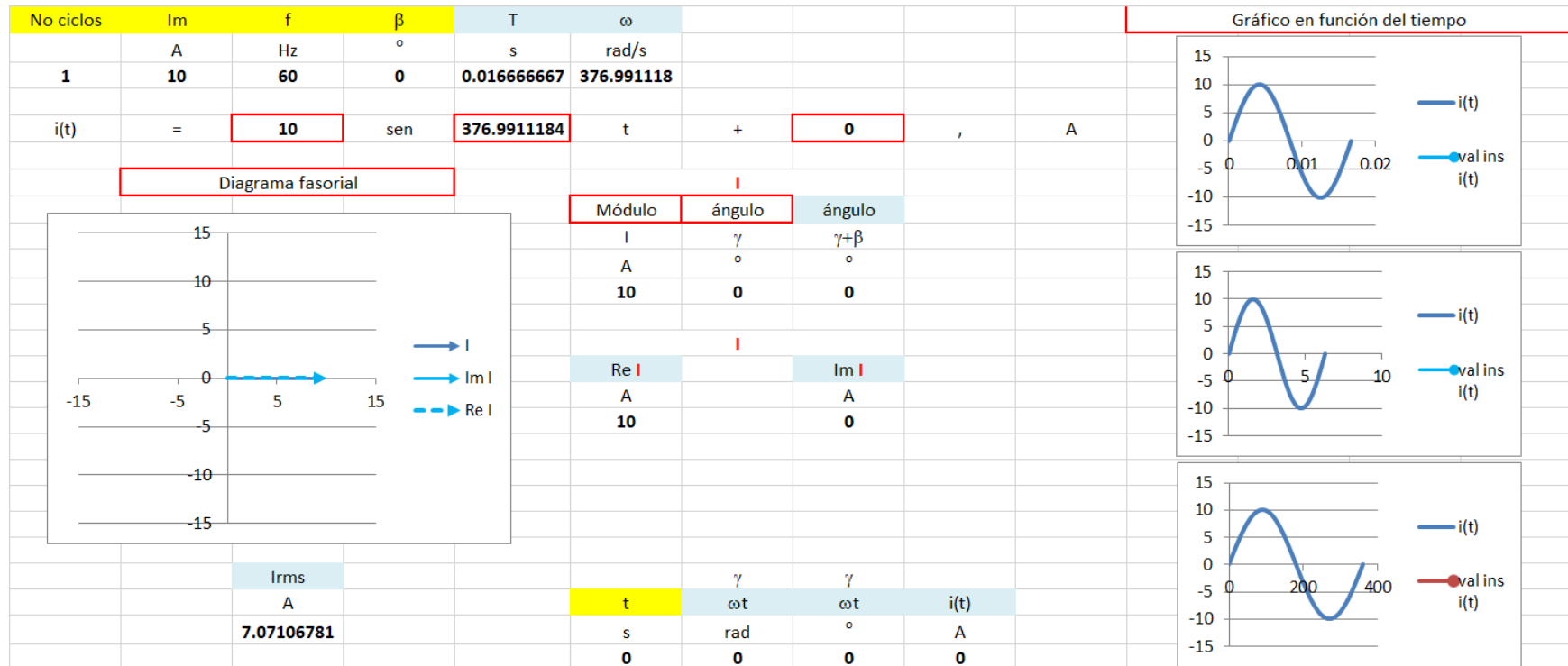


Figura vii Características principales de la corriente alterna, para $t = 0s$.

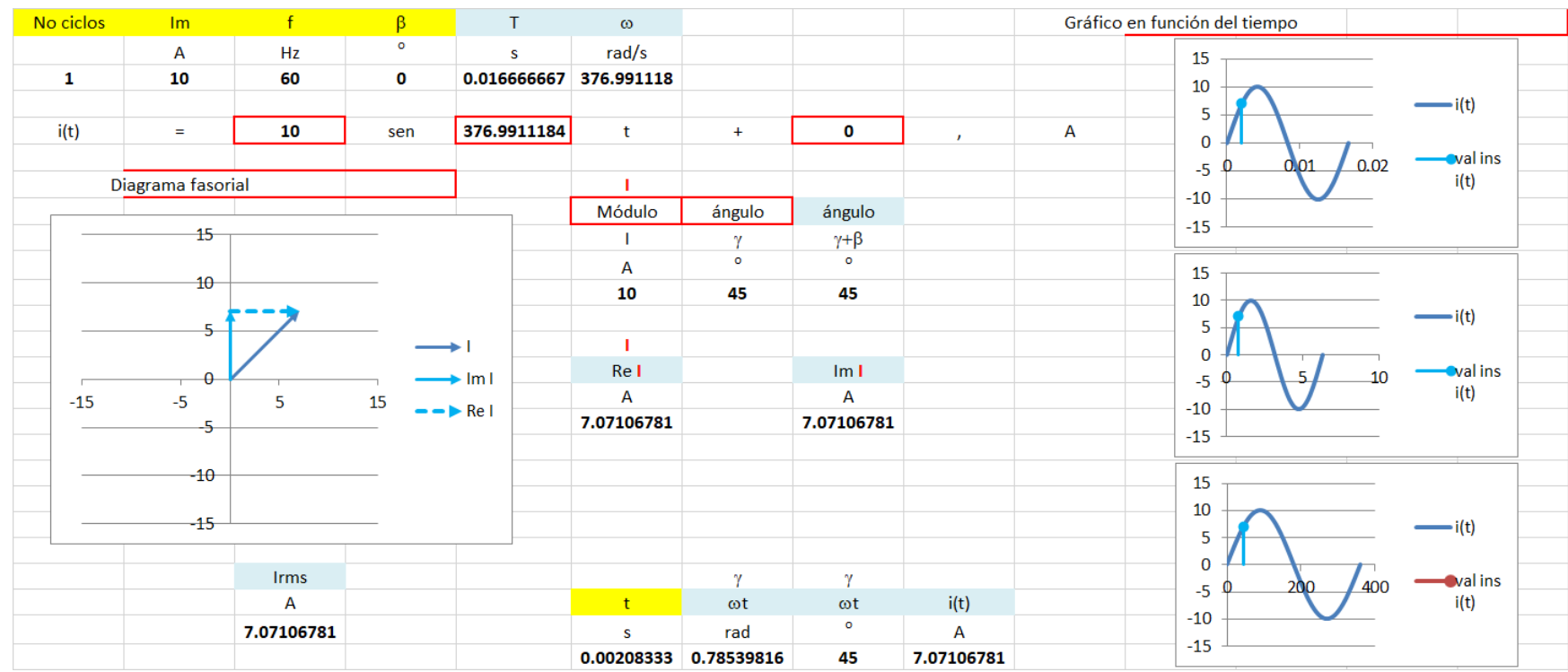


Figura viii Características principales de la corriente alterna, para $t = 0.00208333s$.

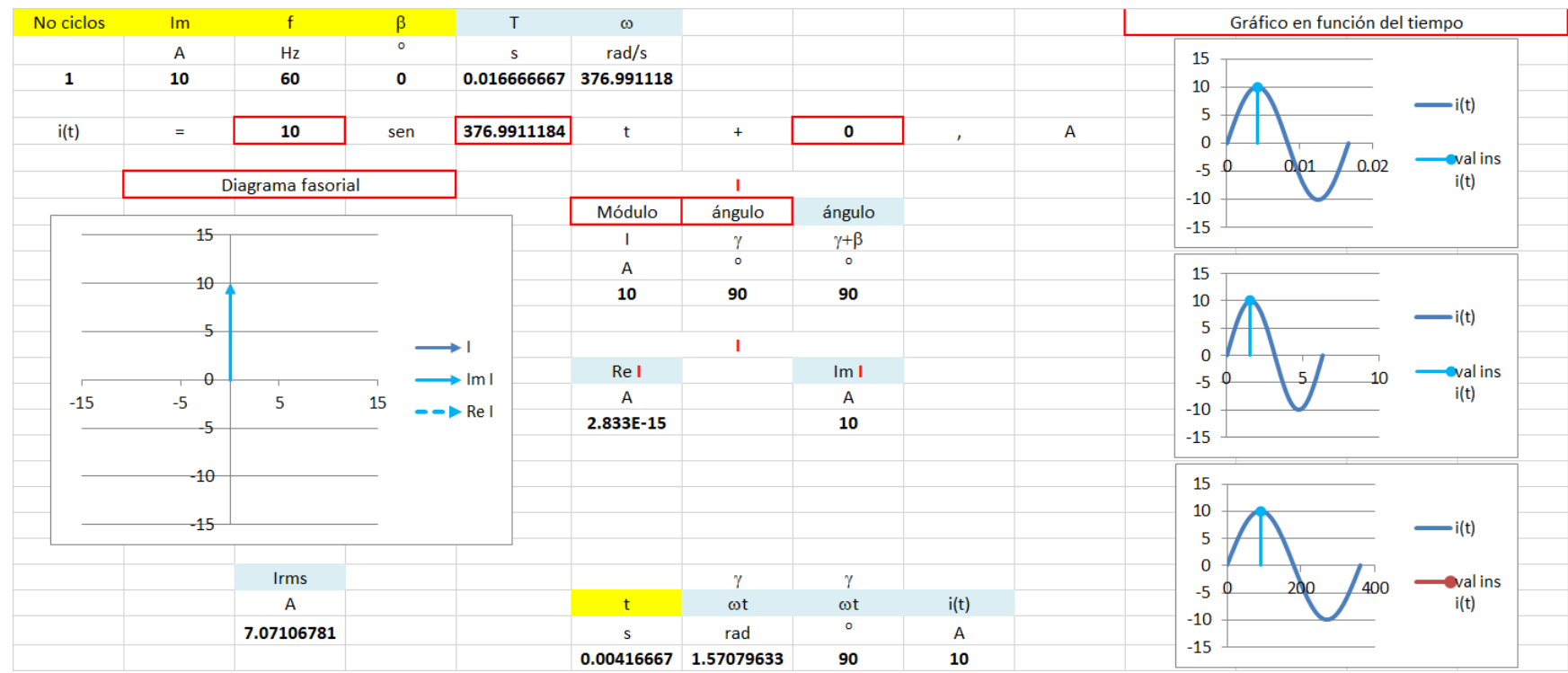


Figura ix Características principales de la corriente alterna, para $t = 0.00416667$ s.

	dato
	cálculo
	el dato se pasa

b) Solución del circuito resistivo-inductivo-capacitivo excitado con corriente alterna”

Esta herramienta computacional considera el tiempo y permite explicar el funcionamiento del circuito resistivo, inductivo y capacitivo.

Circuito resistivo. La corriente y la tensión están en fase (figura x). El gráfico en función del tiempo muestra $e(t)$, $i(t)$, $p(t)$, P , E_{rms} e I_{rms} (las corrientes están amplificadas). El triángulo de potencias muestra que $Q = 0$.

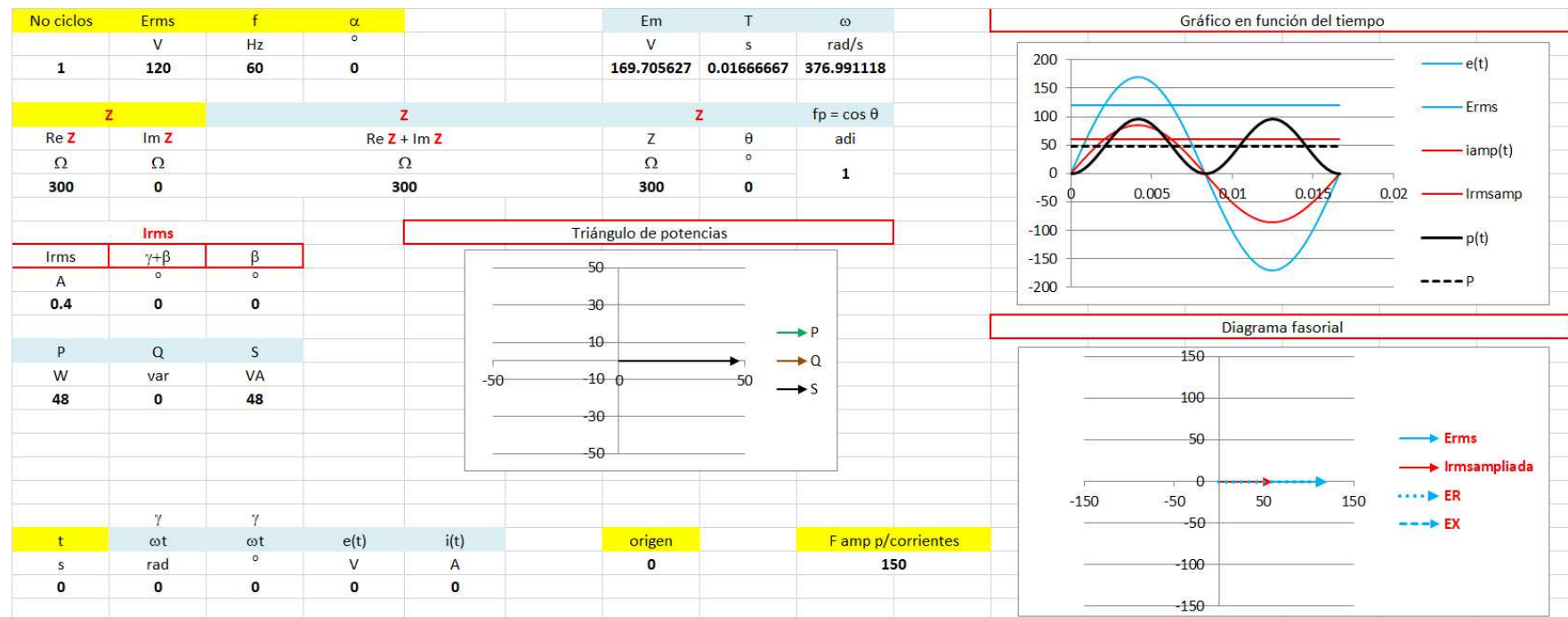


Figura x Solución del circuito resistivo. Para $t = 0s$.

Circuito inductivo. La corriente está atrás de la tensión (figura xi). El gráfico en función del tiempo muestra $e(t)$, $i(t)$, $p(t)$, P , E_{rms} e I_{rms} (las corrientes están amplificadas). El triángulo de potencias muestra que Q es positiva y se encuentra en el primer cuadrante. El diagrama fasorial muestra los fasores $\mathbf{E}$ e $\mathbf{I}$, la caída de tensión en la resistencia $\mathbf{E_R}$ y la caída de tensión en la reactancia $\mathbf{E_X}$ empleando valores rms (la suma de las caídas es $\mathbf{E}$ cumpliendo con la ley de voltaje de Kirchhoff).

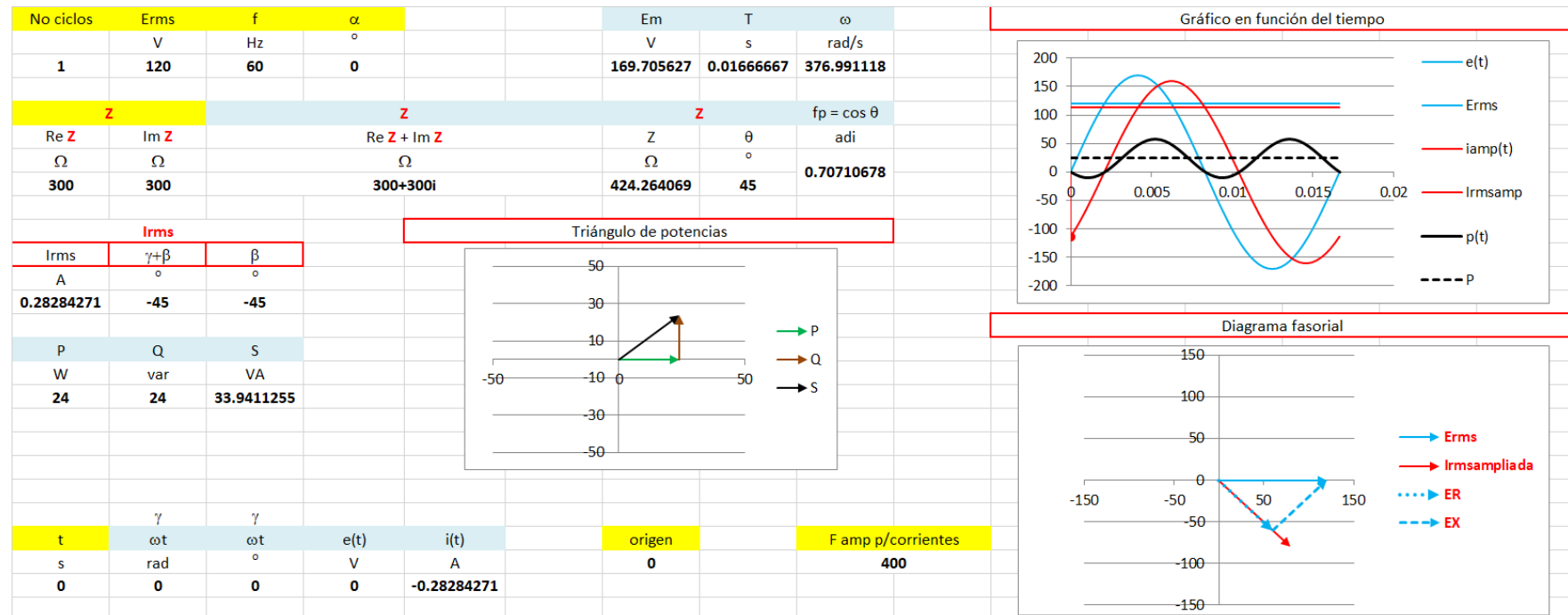


Figura xi Solución del circuito inductivo. Para $t = 0s$.

Circuito capacitivo. La corriente está adelante de la tensión (figura xii). El gráfico en función del tiempo muestra $e(t)$, $i(t)$, $p(t)$, P , E_{rms} e I_{rms} (las corrientes están amplificadas). El triángulo de potencias muestra que Q es negativa y se encuentra en el cuarto cuadrante. El diagrama fasorial muestra los fasores $\mathbf{E}$ e $\mathbf{I}$, la caída de tensión en la resistencia $\mathbf{E_R}$ y la caída de tensión en la reactancia $\mathbf{E_X}$ empleando valores rms (la suma de las caídas es $\mathbf{E}$ cumpliendo con la ley de voltaje de Kirchhoff).

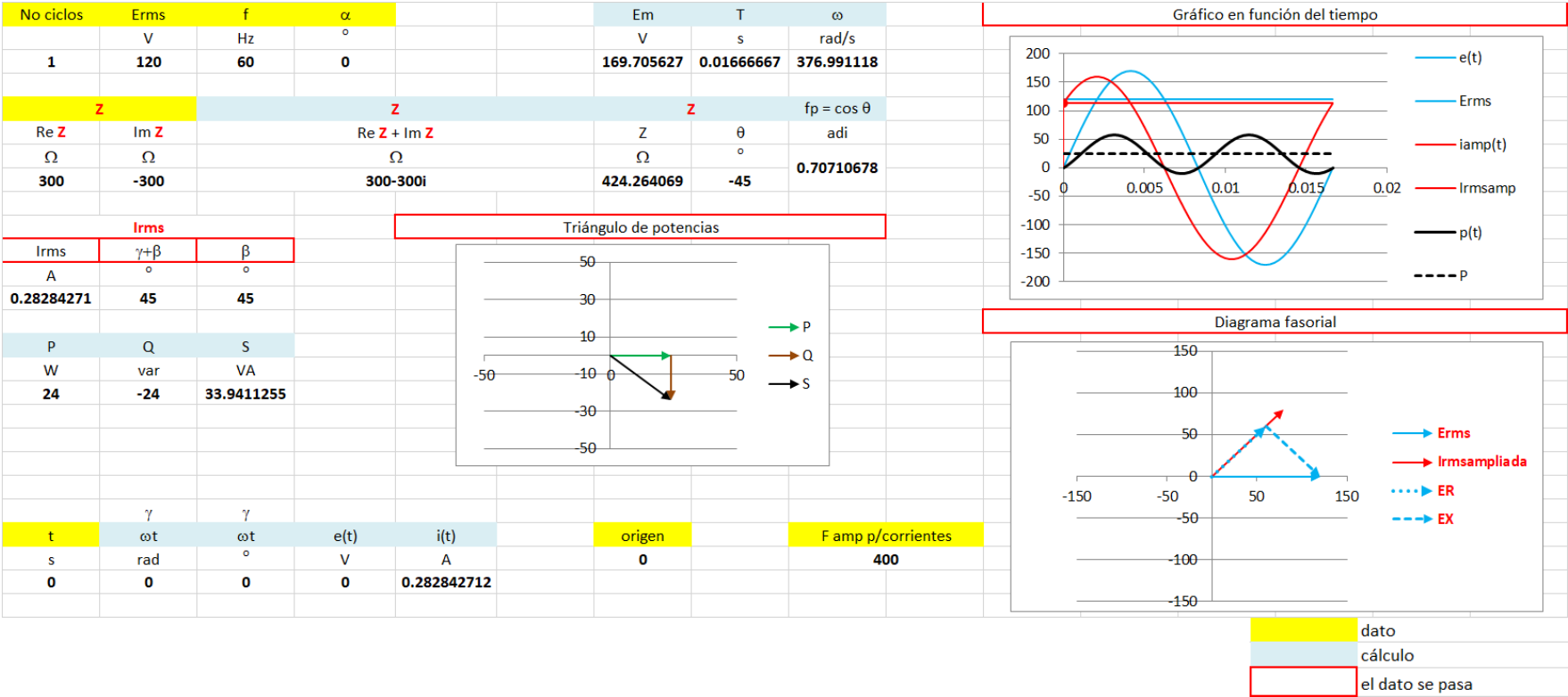


Figura xii Solución del circuito capacitivo. Para $t = 0s$.

Reto 2 Construcción de la herramienta computacional “a) transformador ideal y b) transformador real”

a) Transformador ideal

Esta herramienta computacional permite analizar el modelo del transformador ideal (figura xiii).

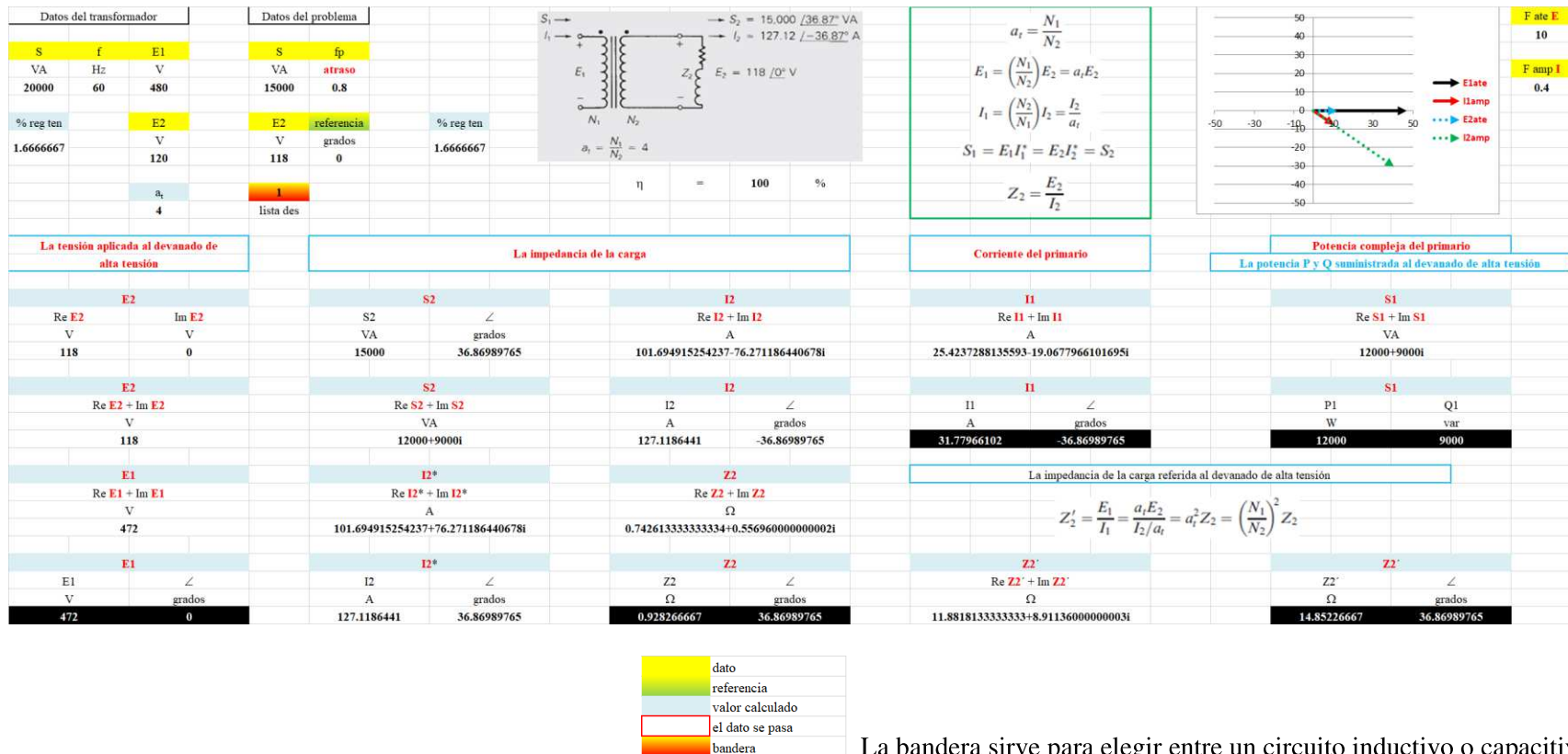


Figura xiii Modelo del transformador ideal.

b) Transformador real

Esta herramienta computacional permite analizar el modelo del transformador real.

La figura xiv calcula los parámetros del transformador. Los datos del transformador se pasan del **complemento: Reto 2 parte a**.

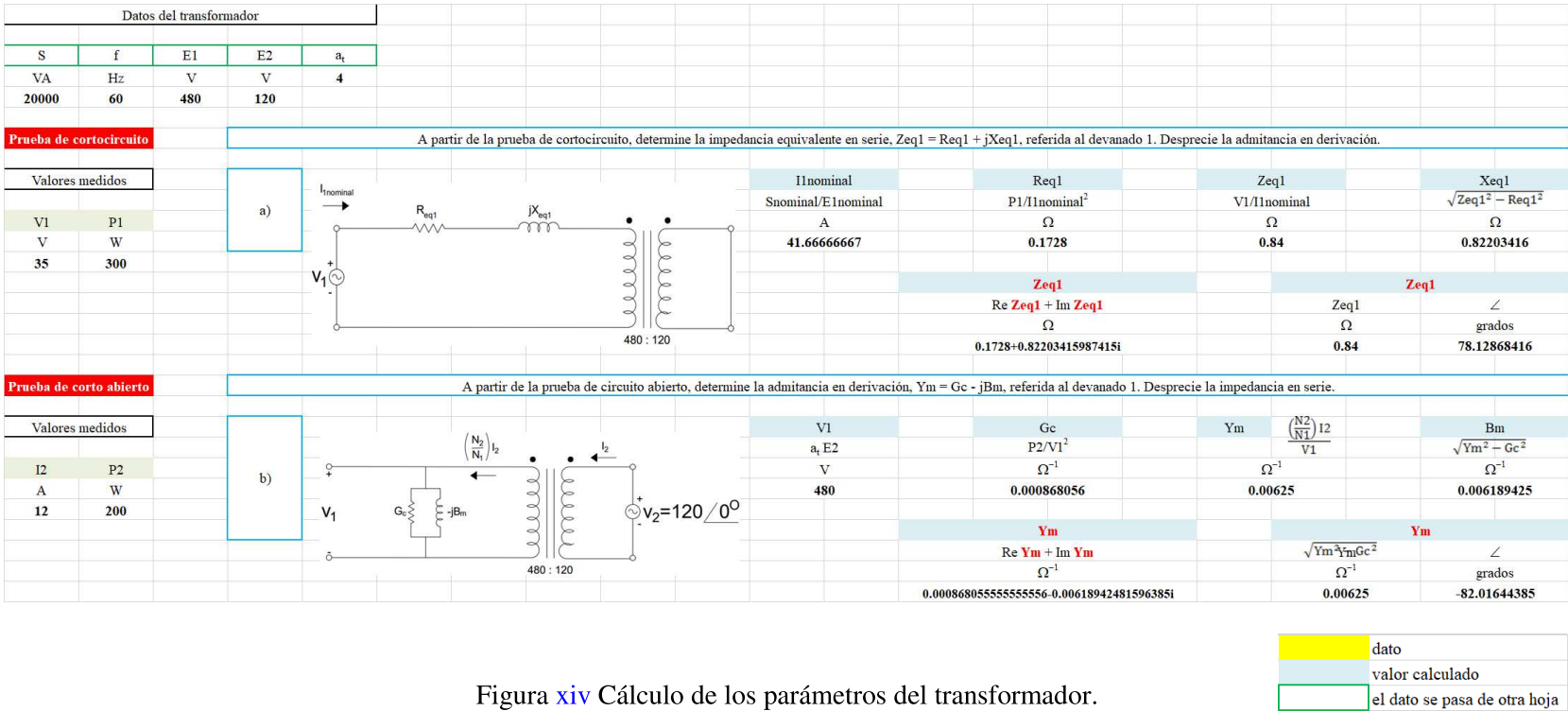


Figura xiv Cálculo de los parámetros del transformador.

La figura xv resuelve el circuito equivalente del transformador (cálculo de corrientes, voltajes, potencias y eficiencia del transformador) mostrando la solución paso a paso. Los datos del transformador y datos del problema se pasan del **complemento: Reto 2 parte a**.

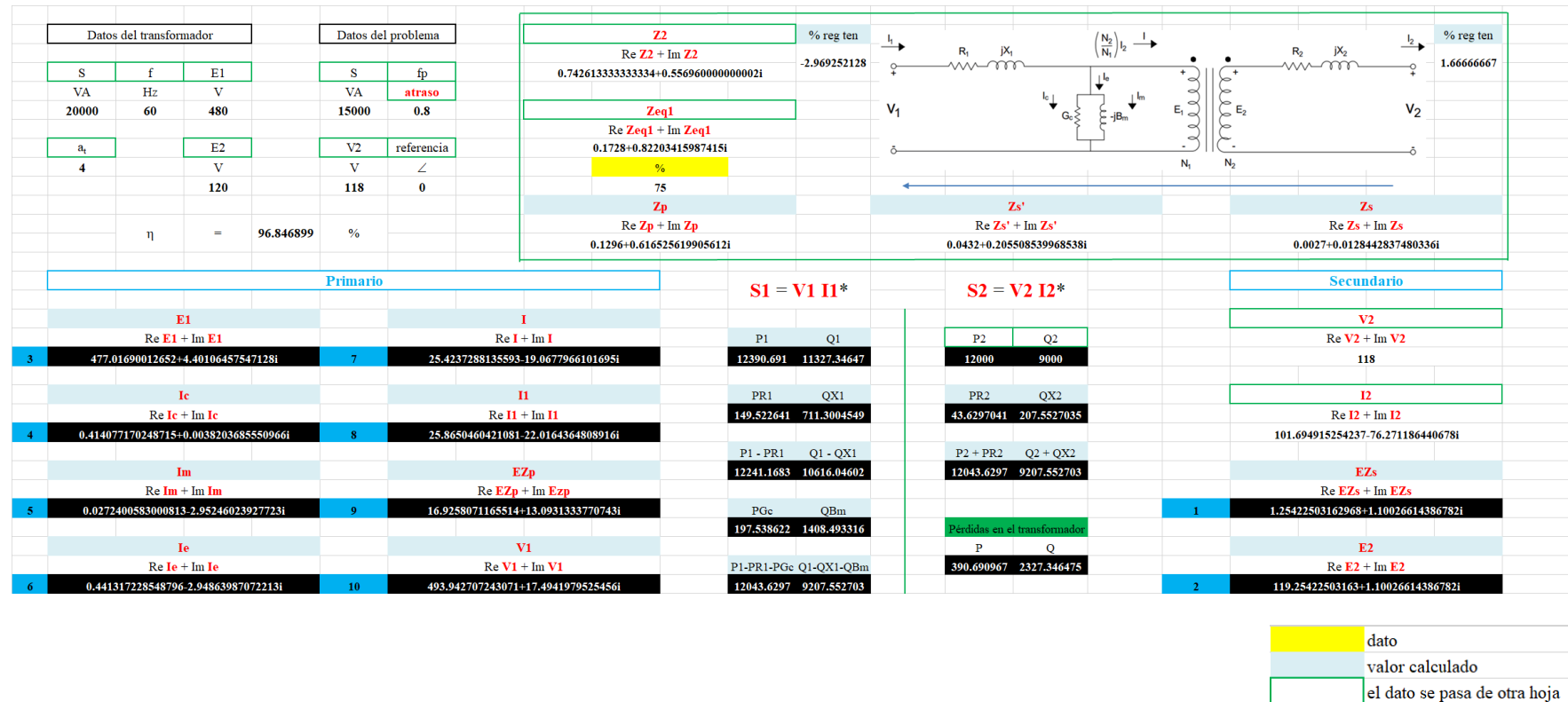


Figura xv Cálculo del circuito equivalente del transformador.

La figura xvi calcula corrientes y voltajes en forma polar, además muestra los diagramas fasoriales para analizar el caso propuesto. Para interpretar los diagramas fasoriales analice el **subtema 1.7**.



Figura xvi Cálculo de corrientes y voltajes en forma polar y diagramas fasoriales.

Las banderas sirven para eliminar fasores en los diagramas fasoriales, lo que permite hacer un mejor análisis.

Rúbrica para evaluar las prácticas de laboratorio

Portada

La portada debe contener:

1. Nombre de la institución
2. Carrera
3. Número y nombre la práctica
4. Nombre de los estudiantes
5. Nombre del profesor
6. Fecha de entrega

En el encabezado aparece mi nombre, esto es así porque un servidor diseño la propuesta. Cuando ustedes envíen su documento deberán quitar mi nombre e incluir el encabezado (si desean incluirlo), pie de página (si desean incluirlo), logotipos (si desean incluirlos).

Objetivos

Incluir los objetivos indicados en la práctica.

Material y equipo

Incluir la lista indicada en la práctica mencionando las especificaciones técnicas del equipo.

Discusión de resultados:

Al reportar resultados calculados de las prácticas de laboratorio deben utilizar 3 cifras de precisión.

1 Deben respetar la propuesta metodológica de la práctica para mostrar resultados sin tener que repetir la redacción de los procedimientos y sin mostrar los circuitos eléctricos.

40%

2 Deben hacer observaciones (2 o más por objetivo) de los experimentos propuestos en los procedimientos (*esta redacción es en equipo*). Estas observaciones se indican en cada objetivo.

10%

Conclusiones

Deben incluir conclusiones por objetivos y son individuales.

Cada conclusión debe ser redactada en un párrafo de 5 renglones completos (el espaciado, tamaño y tipo de letra a considerar es: espacio sencillo, 10 arial o times new roman).

La conclusión es una redacción técnica haciendo referencia a la introducción, ecuaciones, cálculos y comportamientos gráficos.

20%

Demostración práctica

Deben redactar en cada objetivo (sin incluir diagramas eléctricos, cálculos, etc) que fue lo que se hizo y que interpretas de la demostración práctica del objetivo (*esta redacción es en equipo*). Cada demostración práctica debe ser redactada en un párrafo de 8 renglones completos (el espaciado, tamaño y tipo de letra a considerar es: espacio sencillo, 10 arial o times new roman). Esta sección depende de lo que haga un servidor en las demostraciones prácticas ejecutadas en el laboratorio.

30%

Aprendizaje basado en prácticas de laboratorio

Práctica 1

Efectos magnéticos

Objetivos:

- 1 Analizar el experimento de oersted y aplicación de la regla de la mano derecha para determinar la dirección del flujo magnético creado por un conductor.
- 2 Analizar el campo magnético pulsante y aplicación de la regla de la mano derecha para determinar la polaridad de una bobina.
- 3 Analizar la fuerza de Lorentz y aplicación de la regla de la mano derecha para determinar la fuerza ejercida en un conductor sumergido en un campo magnético.
- 4 Analizar la fuerza magnética entre dos conductores paralelos.
- 5 Analizar la Ley de Faraday y la Ley de Lenz.

Material y equipo utilizado

Equipo Lab-Volt:

- 1 Módulo de suministro de potencia EMS8821

Otros:

- 1 Amperímetro de corriente directa
- 1 Resistencia de alambre 11Ω , 21A
- 1 Resistencia de alambre 30Ω , 2.5A
- 1 Galvanómetro con sistema motor magnetoeléctrico de bobina móvil
- 1 Bobina 500 vueltas cal 19
- 1 Bobina circular 700 vueltas cal 24
- 1 Bobina circular 400 vueltas cal 24
- 1 imán de neodimio
- 1 motor a pasos (el motor tiene acoplado un imán de neodimio en su eje)
- 1 Pedazo de acrílico
- 1 Varilla de cobre
- 1 Punta magnética
- 1 Brújula
- 1 Imán de herradura
- 2 Cinta sustentadora (2A)
- 1 Conductor de Al cal 9 de 8 cm de largo
- 4 Soporte
- 1 Tramo de 70cm de alambre magneto (conductores de cobre).
- Cables

Metodología

Objetivo 1

- 1) Conecte el circuito mostrado en la figura a.

Corriente directa

En la figura a se está aplicando la regla de la mano derecha para determinar el sentido del flujo magnético alrededor del conductor (varilla de cobre) por efecto de la corriente. Indique la polaridad de la fuente de alimentación, la polaridad del amperímetro, la dirección de la corriente en la varilla de cobre y la posición de la brújula (polos magnéticos) si el circuito se energizara.

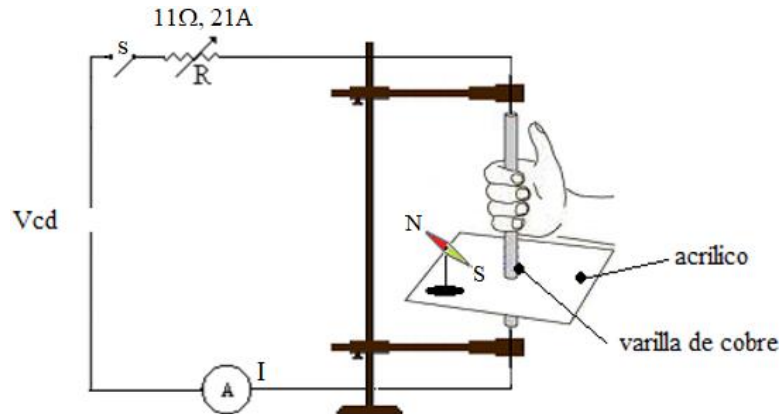


Figura a Experimento de Oersted.

Los cables disponibles en el laboratorio para las conexiones de los circuitos eléctricos soportan máximo 10A (corriente especificada por el fabricante), **P1** ¿Cómo debe conectar dos cables para que el conjunto soporte 20A?

Observación:

1 La varilla de cobre debe soportar 20A, utilice el código eléctrico nacional para alambre de cobre y defina el calibre a usar.

P2 ¿Cuál es el calibre de la varilla de cobre?

La figura b muestra el módulo de suministro de potencia EMS8821.



Entrada:

120/208V 4 cables más tierra, 15A, 3φ

Salida fija:

120/208V, 15A, 3φ

120Vcd, 2A

Salida variable:

0-120/208V, 15A, 3φ

0-120Vcd, 2A

Figura b Módulo de suministro de potencia EMS8821

Verifique que R esté en su resistencia máxima. Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación. Energice el circuito cerrando el interruptor s , modifique el valor de R hasta que $I = 15\text{A}$. Considerando que $I = 15\text{A}$ abra el interruptor y vuélvalo a cerrar, observe el efecto en la brújula. Ahora, mueva la base de la brújula alrededor del conductor y verifique que la forma de las líneas de flujo magnético son círculos concéntricos centrados en el conductor.

Abra el interruptor s e invierta las conexiones en la varilla de cobre y confirme la inversión de polaridades de la brújula cerrando s de nuevo.

P3 ¿Es posible sujetar con las dos manos la varilla de cobre con el circuito energizado? Explique.

P4 ¿La varilla de cobre es una superficie equipotencial?

P5 ¿Qué condiciones deben cumplirse para evitar un choque eléctrico si por error se toca con una mano la varilla de cobre y con un pie desnudo el piso?

Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconéctela (mediante su interruptor), abra el interruptor s .

Corriente alterna

Verifique que R esté en su resistencia máxima. Conecte el circuito de la figura **a** a una fuente de corriente alterna, energice el circuito cerrando el interruptor s , modifique el valor de R hasta que $I_{\text{rms}} = 15\text{A}$, **P6** ¿la brújula se orienta? Explique.

Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconéctela (mediante su interruptor), abra el interruptor s .

Objetivo 2

2) Conecte el circuito mostrado en la figura **c**.

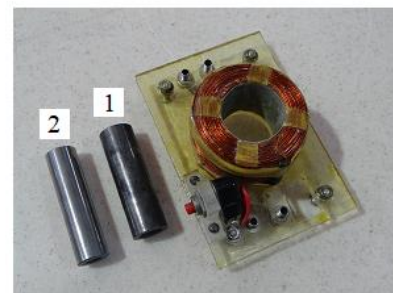
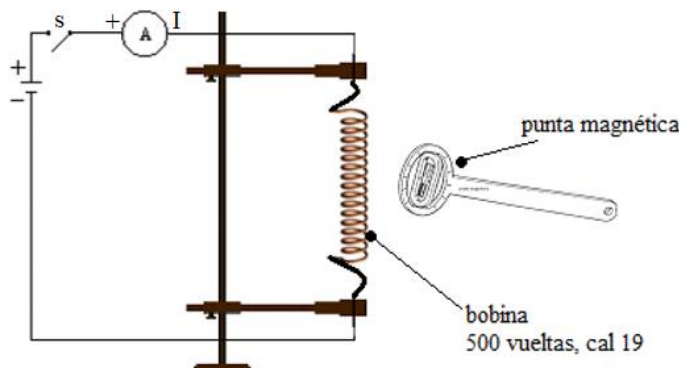


Figura **c** Regla de la mano derecha para determinar la polaridad de una bobina.

Corriente directa

Mida y registre los valores de tensión a aplicar a la bobina para que circulen las corrientes indicadas en la tabla **a**. Calcule la resistencia ohmica de la bobina usando el método del volt-ampere (la resistencia óhmica es el promedio de los 3 valores calculados de R).

Desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor), abra el interruptor s.

Corrija la resistencia óhmica por efecto de temperatura a $T_2 = 45^\circ\text{C}$. Muestre el resultado en la tabla **b**.

Tabla **a** Valores medidos y calculados. Resistencia ohmica de la bobina. $T_1 =$ °C

I A	E V	R Ω	R_{T1} Ω
0.75			
1.5			
2.25			

Tabla **b** Resistencia ohmica de la bobina. $T_2 = 45^\circ\text{C}$

R_{T2} Ω

P7 ¿Cuál es el voltaje de corriente directa a aplicar al circuito para que la corriente sea 2.25A?

Energice el circuito cerrando el interruptor s y verifique que $I = 2.25\text{A}$, acerque la punta magnética a uno de los extremos de la bobina y defina el norte de la bobina. **P8** ¿Cómo aplicaría la regla de la mano derecha para determinar la polaridad de la bobina? Muestre la aplicación de la regla en la figura **d**.

Insertar figura

Figura **d** Aplicación de la regla de la mano derecha para definir la polaridad de una bobina.

Considerando que $I = 2.25\text{A}$ abra el interruptor s y vuélvalo a cerrar, observe el efecto en la punta magnética. Ahora, mueva la punta magnética hacia el otro extremo de la bobina para confirmar que existe un campo magnético externo, **P9** ¿Consideraría que el campo magnético interno es cero? Explique.

Considerando que $I = 2.25\text{A}$, Introduzca el tubo 1 en la bobina, **P10** ¿la corriente I modificó su valor? Explique su respuesta usando la ley de Faraday.

Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconéctela (mediante su interruptor), abra el interruptor s.

Corriente alterna

Energice el circuito cerrando el interruptor s y verifique que $I_{\text{rms}} = 2.25\text{A}$. Determine los parámetros de la bobina: la resistencia efectiva, la reactancia e inductancia de la bobina de 500

vueltas para los casos i) sin tubos, ii) 1 tubo y iii) 2 tubos. Registre los valores medidos y calculados en las tablas **c**, **d** y **e**.

Tabla **c** Valores medidos y calculados. Cálculo de los parámetros de la bobina.

Caso 1 Bobina sin tubos.

Valores medidos			Valores calculados		
I	P	Q	Re_{T1}	XL	L
A	W	var	Ω	Ω	H
2.25					

Tabla **d** Valores medidos y calculados. Cálculo de los parámetros de la bobina.

Caso 2 Tubo 1 en el interior de la bobina.

Valores medidos			Valores calculados		
I	P	Q	Re_{T1}	XL	L
A	W	var	Ω	Ω	H
2.25					

Tabla **e** Valores medidos y calculados. Cálculo de los parámetros de la bobina.

Caso 3 Tubo 1 y 2 en el interior de la bobina (el tubo 2 encima del tubo 1).

Valores medidos			Valores calculados		
I	P	Q	Re_{T1}	XL	L
A	W	var	Ω	Ω	H
2.25					

Si el circuito se energiza con corriente alterna, **P11** ¿la polaridad cambia? Si la punta magnética se aproxima a cualquiera de los extremos de la bobina **P12** ¿El imán gira?

Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconéctela (mediante su interruptor), abra el interruptor s.

Considerando los valores medidos y calculados de las tablas **c**, **d** y **e**, **P13** ¿consideraría que la intensidad del campo magnético que produce la bobina es la misma?

P14 ¿La bobina produce ruido? Explique.

Observación:

2 La resistencia efectiva se corrige usando el modelo matemático empleado en la tabla **b**.

Objetivo 3

3) Conecte el circuito mostrado en la figura **e**.

Predicción. Conecte el borne + al 1 y el 2 al borne -. Utilice la regla de la mano derecha para determinar la dirección de la fuerza que el conductor experimenta. Indique en la tabla **f** la dirección de la fuerza mediante una palomita.

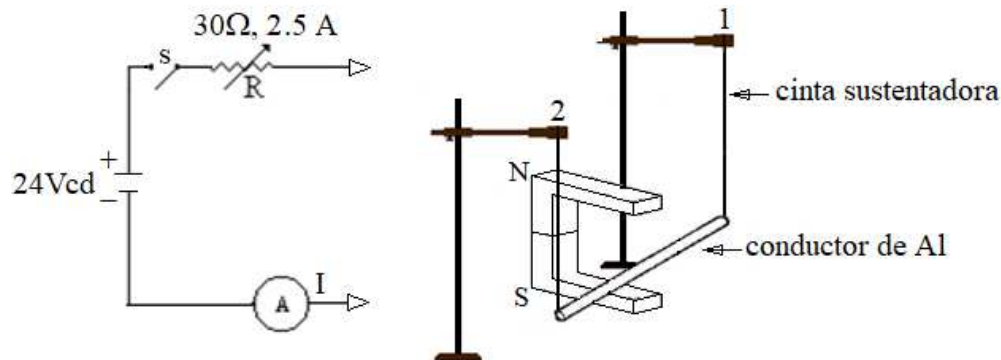


Figura e Fuerza sobre un conductor (fuerza de Lorentz).

Tabla f Dirección de la fuerza.

Hacia la izquierda	Hacia la derecha

Verifique que R esté en su resistencia máxima. Energice el circuito cerrando el interruptor s , modifique el valor de R hasta que $I = 1.5A$. Considerando que $I = 1.5A$ abra el interruptor s y vuélvalo a cerrar, observe el efecto en el conductor, **P15** ¿Por qué el conductor suspendido de las cintas sustentadoras debe ser de Al?

Observación:

3 La corriente I no debe superar 2 A para evitar que las cintas sustentadoras se destruyan.

Abra el interruptor s e intercambie los cables conectados al conductor, cierre el interruptor s y observe el efecto en el conductor, **P16** ¿La dirección del movimiento cambió?

Intercambie la posición del imán, **P17** ¿La dirección del movimiento cambió?

P18 ¿Cuál es su predicción si el circuito se energiza con corriente alterna?

Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconéctela (mediante su interruptor), abra el interruptor s .

Objetivo 4

4) Conecte el circuito mostrado en la figura f, separe los conductores de cobre 0.5cm.

Con el propósito de observar el efecto la corriente que circulará por el circuito será de 10A, **P19** ¿Cuál debe ser el calibre de los conductores de cobre?

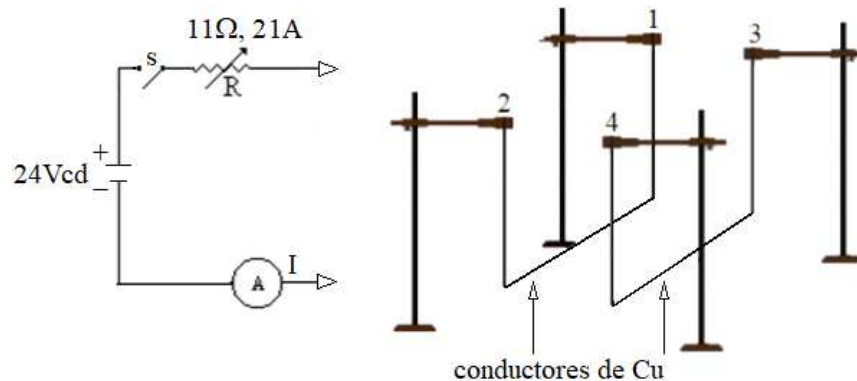


Figura f Fuerza magnética entre dos conductores.

Corriente directa

Verifique que R esté en su resistencia máxima. Conecte el borne + al 1, el 2 al 3 y termine con el 4 al borne -. Energice el circuito cerrando el interruptor s, modifique el valor de R hasta que $I = 10A$. Considerando que $I = 10A$ abra el interruptor s y vuélvalo a cerrar, observe el efecto en los conductores, **P20** ¿la fuerza es de atracción o de repulsión? Muestre el efecto en la figura g.

Insertar figura

Figura g Las dos corrientes llevan la misma dirección por lo que la fuerza es de atracción.

Desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor), abra el interruptor s.

No modifique el valor de la resistencia R. Ahora conecte el borne + al 1, el 2 al 4 y termine con el 3 al borne -. Energice el circuito cerrando el interruptor s, considerando que $I = 10A$ abra el interruptor s y vuélvalo a cerrar, observe el efecto en los conductores, **P21** ¿la fuerza es de atracción o de repulsión? Muestre el efecto en la figura h.

Insertar figura

Figura h Las corrientes llevan dirección contraria por lo que la fuerza es de repulsión.

Desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor), abra el interruptor s.

Intercambie las terminales en la fuente de alimentación y cierre el interruptor s, **P22** ¿la fuerza es de atracción o de repulsión? Explique.

Desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor), abra el interruptor s.

Corriente alterna

Verifique que R esté en su resistencia máxima. Conecte el circuito de la figura f a una fuente de corriente alterna, energice el circuito cerrando el interruptor s, modifique el valor de R hasta que $I_{rms} = 10A$, **P23** ¿Cuál es su predicción si el circuito se energiza con corriente alterna?, **P24** ¿consideraría que los conductores vibran?

Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconéctela (mediante su interruptor), abra el interruptor s.

Objetivo 5

5) Considere las bobinas mostradas en la figura i.

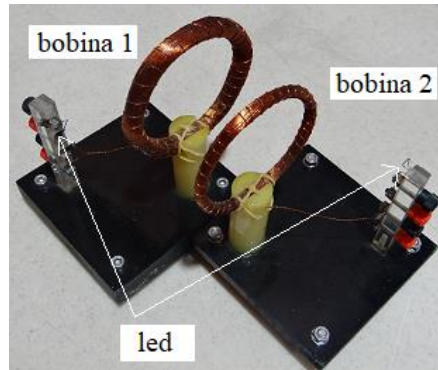


Figura i Bobinas para explicar el experimento de Faraday.

Conecte la bobina 1 al galvanómetro y desplace el imán de neodimio hacia la bobina como se muestra en la figura j.

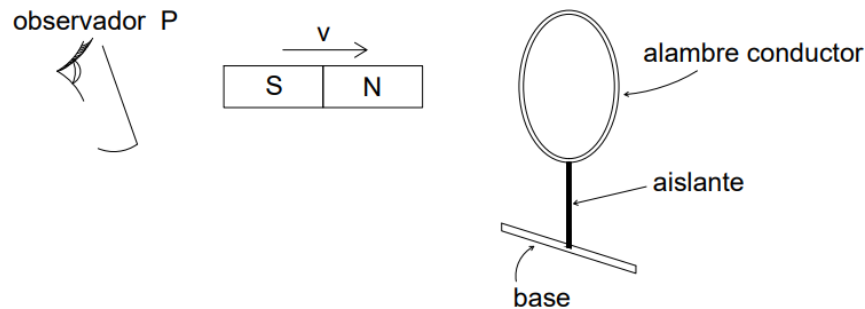


Figura j Experimento de Faraday.

P25 ¿La deflexión de la aguja fue hacia la izquierda o hacia la derecha?

Ahora, desplace el imán de neodimio en sentido contrario, **P26** ¿La deflexión de la aguja fue hacia la izquierda o hacia la derecha?

Si el imán se desplace en ambas direcciones, **P27** ¿consideraría que se induce en la bobina corriente alterna?

Gire el imán 90° y acérquelo o aléjelo de la bobina, **P28** ¿se induce tensión en la bobina? Explique.

Considere la figura j. Emplee el motor paso a paso mostrado en la figura k (el motor paso a paso tiene acoplado un imán de neodimio en su eje) y use el **complemento: Práctica 4 Tema 5** para hacer girar el motor paso a paso a diferentes velocidades y observe el instrumento de medición, **P29** ¿se induce en la bobina corriente alterna? **P30** ¿la tensión inducida aumenta con la velocidad?

Invierta el sentido de rotación del motor paso a paso, **P31** ¿cambió la polaridad de la tensión inducida?



Figura k Motor a pasos (el motor paso a paso tiene acoplado un imán de neodimio en su eje).

Use el arreglo de la figura i. Conecte la bobina 1 a una fuente de alimentación de corriente alterna y aplique tal tensión que haga que la corriente en la bobina sea $I_{rms} = 0.8A$. Ahora, conecte la bobina 2 al galvanómetro, **P32** ¿la aguja se desplazó hacia un lado y hacia otro? Explique. Reemplace el galvanómetro por cualquiera de los 2 leds, **P33** ¿el led enciende? Explique.

Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconéctela (mediante su interruptor).

Sugerencias didácticas

Antes de energizar cualquier circuito verifique las erogaciones en corriente directa y en corriente alterna de los módulos de suministro de potencia.

Reporte del equipo:

Ver la rúbrica para evaluar prácticas de laboratorio.

Referencia:

Diseño del complemento:
Práctica 1

“Tema 1” de la asignatura **“Máquinas Eléctricas”**

M. C. José Alejandro Morones Alba
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Práctica 2

El transformador

Para esta práctica se emplea el **complemento: Reto 1 y 2**.

Objetivos:

- 1 Analizar el transformador elemental y comprender el modelo matemático del transformador ideal.
- 2 Determinación de los parámetros del transformador real.
- 3 Analizar y resolver el circuito equivalente.
- 4 Calcular la regulación de tensión del transformador con diferentes tipos de carga.
- 5 Calcular la eficiencia del transformador.

Introducción

Muestre los cálculos (a mano) de las tablas **b, f, g, h, i, j, k, n, o y p**.

Material y equipo utilizado

Otros:

- 1 Amperímetro de gancho
- 1 Amperímetro de corriente alterna
- 1 Wattmetro-varmetro
- 1 Multímetro
- 1 Transformador monofásico 60Hz, 100/6.5V, 117V
- 1 Carga monofásica “prototipo de un motor de inducción con condensador de marcha”
- Cables

Equipo Lab-Volt

- 1 Módulo de suministro de potencia EMS8821
- 1 Transformador EMS8341
- 1 Carga resistiva EMS8311
- 1 Carga inductiva EMS8321
- 1 Carga capacitiva EMS8331

Metodología

La figura **a** muestra el transformador monofásico de dos devanados y la figura **b** muestra la carga empleados en esta práctica de laboratorio.

La tabla **a** muestra las especificaciones técnicas del transformador definidas por el fabricante.

Tabla **a** Especificaciones técnicas del fabricante para el transformador monofásico mostrado en la figura **a**.

Fases	f	E ₁	E ₂	S
	Hz	V	V	VA
1	60	100	3 - 6.5	117



E_2
3 - 3.5 - 4 - 4.5 - 5 - 5.5 - 6 - 6.5

Figura a Transformador monofásico de dos devanados.

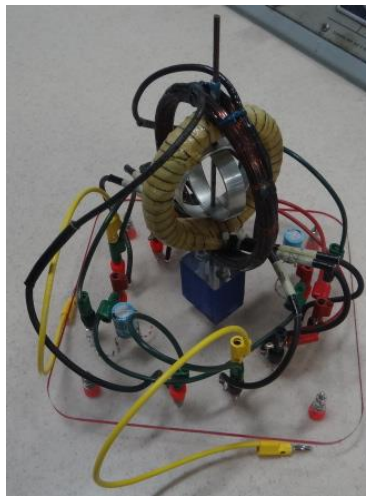


Figura b Carga monofásica “prototipo de un motor de inducción con condensador de marcha”.

Observación:

1 La carga es un prototipo de un motor de inducción con condensador de marcha. Esta carga se analizada en el **complemento: Práctica 2 Tema 5 Objetivo 1**.

Para reportar resultados del **objetivo 1** use el **complemento: Reto 2 parte a** y para los **objetivos 2, 3, 4 y 5** use el **complemento: Reto 2 parte b**.

Objetivo 1

1) La capacidad nominal del transformador monofásico de dos devanados es de 117VA, 100/6.5V, 60Hz. Una fuente conectada al devanado de 100V alimenta la carga (figura b) conectada al

Ingeniería Eléctrica

devanado de 6.5V. La carga absorbe 19.5W y 10.9var, cuando la tensión que se le aplica 6.41V. Suponga que el transformador es ideal, calcule y registre en la tabla **b** lo siguiente:

- i) La tensión aplicada al devanado de 100V.
- ii) La impedancia de la carga.
- iii) La impedancia de la carga referida al devanado de 100V y
- iv) La potencia real y reactiva suministrada al devanado de 100V.

Tabla **b** Valores calculados. i), ii), iii) y iv).

E_1		E_2		Z_2	
V	$\angle^\circ$	V	Ref ($\angle^\circ$)	Ω	$\angle^\circ$
		6.41			

Z_2'		P_1	Q_1
Ω	$\angle^\circ$	W	var

Muestre en la figura **c** el diagrama fasorial para el transformador ideal (tensiones y corrientes).

Insertar figura

Figura **c** Diagrama fasorial para el transformador ideal.

2) Conecte la carga al devanado de 6.5V del transformador (secundario). Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación. Conecte el primario del transformador a una fuente de alimentación de corriente alterna. Mida y registre los valores indicados en la tabla **c** cuando la tensión que se aplica a la carga es 6.41V (adicione al circuito un amperímetro y el watt-var, tanto en el primario como en el secundario).

Tabla **c** Valores medidos. Tensión aplicada al transformador, corrientes y potencias.

I_2	V_2	P_2	Q_2
A	V	W	var
	6.41		
V_1	I_1	P_1	Q_1
V	A	W	var

Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconéctela (mediante su interruptor).

Objetivo 2

3) Pruebas de cortocircuito y de circuito abierto del transformador. La capacidad nominal de un transformador monofásico de dos devanados es de 117VA, 100/6.5 V, 60Hz. Durante una prueba de cortocircuito (use la figura **viii**), en donde se aplica la corriente nominal a la frecuencia nominal al devanado de 100V (primario), con el devanado de 6.5V (secundario) en cortocircuito, se obtienen las lecturas de V_1 y P_1 (registre los valores en la tabla **d**). Durante una prueba de circuito abierto (use la figura **ix**), en donde se aplica la tensión nominal al devanado 2, con el devanado 1 abierto, se obtienen las lecturas de I_2 y P_2 (registre los valores en la tabla **e**).

Tabla d Valor calculado y valores medidos. Prueba de cortocircuito.

I_1	V_1	P_1
A	V	W

Tabla e Valores medidos. Prueba de circuito abierto.

E_2	I_2	P_2
V	A	W
6.5		

Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconéctela (mediante su interruptor).

Calcule:

- A partir de la prueba de corto circuito, determine la impedancia equivalente en serie, $Z_{eq1} = R_{eq1} + jX_{eq1}$ (Desprecie la admitancia en derivación). Registre el valor Z_{eq1} en la tabla f.
- A partir de la prueba de circuito abierto, determine la admitancia en derivación, $Y_m = G_c - jB_m$ (Desprecie la impedancia en serie). Registre el valor Y_m en la tabla g.

Tabla f Valor calculado. Impedancia equivalente Z_{eq1} .
(despreciando la admitancia en derivación).

Z_{eq1}	
Ω	$\angle^\circ$

Tabla g Valor calculado. Admitancia en derivación Y_m
(despreciando la impedancia en serie).

Y_m	
Ω^{-1}	$\angle^\circ$

Objetivo 3

- 3) Considere el 75% de Z_{eq1} para calcular Z_p . Registre los valores indicados en la tabla h.

Tabla h Valor calculado. Impedancia del primario e impedancia del secundario.

Z_p		Z_s'		Z_s	
Re Z_p	Im Z_p	Re Z_s'	Im Z_s'	Re Z_s	Im Z_s
Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω

Resuelva el circuito equivalente del transformador. Muestre los resultados en la tabla i.

Muestre en la figura d, e, f, y g los diagramas fasoriales 1, 2, 3 y 4.

Insertar figura

Figura **d** Diagrama fasorial 1. Transformador real.

Insertar figura

Figura **e** Diagrama fasorial 2. Transformador real.

Insertar figura

Figura **f** Diagrama fasorial 3. Transformador real.

Insertar figura

Figura **g** Diagrama fasorial 4. Transformador real.

Tabla **i** Solución del circuito equivalente del transformador.

1	E_{Zs}	
	V	∠°
2	E₂	
	V	∠°
3	E₁	
	V	∠°
4	I_c	
	A	∠°
5	I_m	
	A	∠°
6	I_e	
	A	∠°
7	I	
	A	∠°
8	I₁	
	A	∠°
9	E_{Zp}	
	V	∠°
10	V₁	
	V	∠°

Objetivo 4

- 4) Calcule el % de regulación del transformador real. Muestre los resultados en la tabla j.

Tabla j % de regulación de tensión del transformador real.

% reg ten primario	% reg ten secundario

Experimento adicional:

La figura h muestra el transformador EMS8341 empleado para analizar el % de regulación de tensión para diferentes tipos de carga.

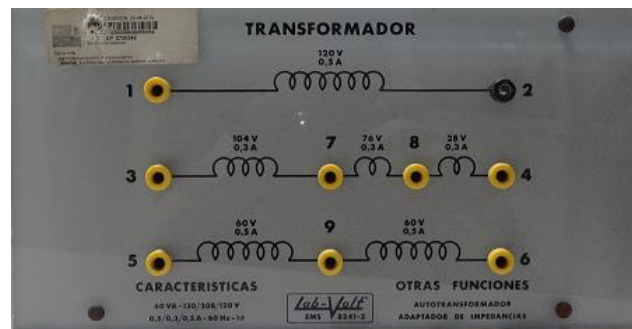


Figura h Transformador EMS8341 60VA, 120/208/120ca, 1 ϕ .

Conecte el circuito de la figura i.

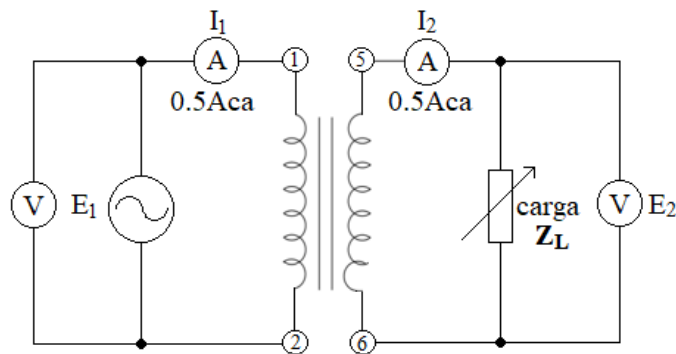


Figura i Circuito para analizar la regulación de tensión con cargas variables resistivas, inductivas y capacitivas.

Carga resistiva

La figura i muestra la carga resistiva EMS8311.



Figura i Carga resistiva EMS8311 252W, 120V, ca/cd, precisión $\pm 5\%$.

Abra todos los interruptores de la carga resistiva. Conecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor) y ajuste el voltaje E_1 a 120V (haga ajustes eventuales en E_1 cada vez que la carga se incrementa, E_1 es el voltaje nominal del devanado 1 a 2). Mida, registre y calcule los valores indicados en la tabla **k**.

Tabla k Valores medidos y valor calculado. % de regulación de tensión con carga resistiva.

Carga resistiva	I ₂ A	E ₂ V	I ₁ A	% reg ten	S ₂ VA
∞					
1200					
600					
400					
300					
240					

Observación:

2 Para calcular el % de regulación de tensión utilice el voltaje de salida en vacío y el voltaje para cada carga, anotados en las tablas **k**, **l** y **m**.

Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconéctela (mediante su interruptor).

Carga inductiva

La figura j muestra la carga inductiva EMS8321.

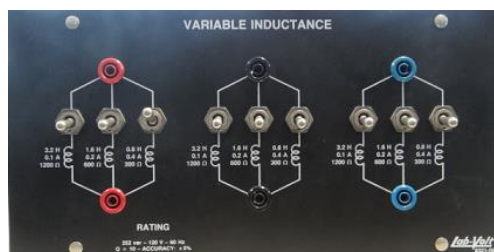


Figura j Carga inductiva EMS8321 252var, 120V, 60Hz, precisión $\pm 5\%$.

Abra todos los interruptores de la carga inductiva. Conecte la fuente de alimentación y ajuste el voltaje E_1 a 120V (haga ajustes eventuales en E_1 cada vez que la carga se incrementa, E_1 es el voltaje nominal del devanado 1 a 2). Mida, registre y calcule los valores indicados en la tabla 1.

Carga inductiva	I ₂ A	E ₂ V	I ₁ A	% reg ten	S ₂ VA
∞					
1200					
•					
240					

Carga capacitiva

CAPACIDAD VARIABLE

0.3 0.4 0.8
1500 600 300

0.3 0.4 0.8
1500 600 300

0.3 0.4 0.8
1500 600 300

CARACTERISTICAS

555 VOL - 100 V (240 MAX.) - 60 Hz
PRECISION 15%

OTRAS FUNCIONES

CARGA TERMOICA
EMISIÓN DE CIRCUITO

Abra todos los interruptores de la carga inductiva. Conecte la fuente de alimentación y ajuste el voltaje E_1 a 120V (haga ajustes eventuales en E_1 cada vez que la carga se incrementa, E_1 es el voltaje nominal del devanado 1 a 2). Mida, registre y calcule los valores indicados en la tabla m.

Carga capacitiva	I ₂ A	E ₂ V	I ₁ A	% reg ten	S ₂ VA
∞					
1200					
•					
240					

Trace la curva de regulación del voltaje de salida E2 en función de la corriente de salida I2, para carga tipo de carga del transformador. Muestre los comportamientos en la figura 1.

Figura 1 E_2 vs I_2 para cada tipo de carga del transformador.

5) Calcule las pérdidas en cada impedancia del transformador, muestre los resultados en la tabla n.

Calcule las pérdidas en el transformador. Muestre los resultados en la tabla o.

Calcule la eficiencia del transformador real. Muestre el resultado en la tabla p.

Tabla n Pérdidas en cada impedancia del transformador.

P1	Q1	P2	Q2
W	var	W	var
PR1	QX1	PR2	QX2
W	var	W	var
P1 - PR1	Q1 - QX1	P2 + PR2	Q2 + QX2
W	var	W	var
PGc	QBm		
W	var		
P1-PR1-PGc	Q1-QX1-QBm		
W	var		

Tabla o Pérdidas en el transformador.

P	Q
W	var

Tabla p % de regulación de tensión del transformador real.

η %

Sugerencias didácticas

La carga (prototipo de un motor de inducción con condensador de marcha) es una máquina eléctrica diseñada para operar con 6.5V corriente alterna. El transformador usado para la práctica de laboratorio es ideal para la esta carga en cuanto a tensión; sin embargo, está muy sobrado en corriente.

Construir el **complemento: Reto 2 parte a** para comprender el funcionamiento del transformador ideal es importante porque permite analizar el modelo matemático propuesto por el profesor. La herramienta computacional ofrece resultados al instante (datos, cálculos, gráficas y el diagrama vectorial), lo que permite discutir al momento con el alumno para que se apodere del conocimiento.

Construir el **complemento: Reto 2 parte b** para comprender el funcionamiento del transformador real es importante porque permite analizar el modelo matemático propuesto por el profesor y aplicarlo satisfactoriamente a la práctica de laboratorio. La herramienta computacional ofrece resultados al instante (datos, cálculos y diagramas vectoriales), lo que permite discutir al momento con el alumno para que se apodere del conocimiento. La herramienta computacional resuelve el circuito equivalente del transformador (definiendo previamente los parámetros) calculando voltajes, corrientes, % de regulación de tensión, pérdidas y la eficiencia del transformador.

El **complemento: Reto 2 parte b** permite eliminar cualquier impedancia del circuito equivalente. Por ejemplo, si el transformador opera en vacío, la corriente que circula por el primario será solo la corriente de excitación I_e .

Una vez resuelto el circuito equivalente para el caso deseado puede utilizarse el **complemento: Reto 1 parte b** para aplicarlo tanto al primario como al secundario con el propósito de analizar el transformador en términos de lo que este complemento muestra.

Reporte del equipo:

A la rúbrica para evaluar prácticas de laboratorio se adicionó el rubro introducción, por lo que los porcentajes para esta práctica de laboratorio son:

Introducción

Lo que se indique en la práctica.

20%

Discusión de resultados:

30%

10%

Conclusiones

20%

Demostración práctica

20%

Referencias:

Diseño del complemento: Práctica 2

“**Tema 1**” de la asignatura “**Máquinas Eléctricas**”

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Experimento de laboratorio No. 41 Regulación del transformador

Experimento adicional a la práctica 2 Objetivo 4

EXPERIMENTOS CON EQUIPO ELÉCTRICO

Theodore Wildi, Michael J. De Vito

Editorial Limusa, México. 1975

Lab-Volt, Sistemas Educativos

Práctica 3

El autotransformador

Objetivos:

- 1 Estudio de la relación de voltaje y corriente de un autotransformador.
- 2 Como se conecta un transformador estándar para que trabaje como un autotransformador.

Material y equipo utilizado

Equipo Lab-Volt

- 1 Módulo de suministro de potencia EMS8821
- 3 Transformador EMS8341
- 1 Carga resistiva EMS8311

Otros:

- 2 Amperímetro de corriente alterna
- 2 Multímetro
- Cables

Metodología

Objetivo 1 y 2

- 1) Conecte el circuito de la figura a.

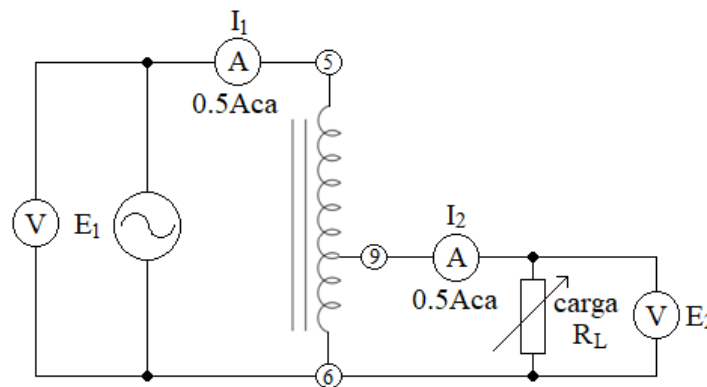


Figura a Autotransformador como reductor.

El devanado que va del 5 al 6 se une a la fuente de alimentación como si fuera el primario. La derivación central del devanado, en el terminal 9, se conecta a un lado de la carga, mientras que la parte que va del 6 al 9 del devanado primario se establece como el devanado secundario.

Abra todos los interruptores de la carga resistiva para que la corriente de carga sea cero. Ajuste el voltaje de la fuente de alimentación a cero. Conecte la fuente de alimentación y establezca el voltaje E_1 en 120V (E_1 es el voltaje nominal entre los devanados 5 y 6). Cambie la resistencia de carga R_L a 120 Ω . Realice las mediciones, registre y calcule lo que se indica en la tabla a.

Tabla a Corrientes I_1 e I_2 y tensión E_2 . Autotransformador como reductor.

I_1 A	I_2 A	E_2 V	S_1 VA	S_2 VA

Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconéctela (mediante su interruptor).

P1 ¿Son aproximadamente iguales S_1 y S_2 ? Explique.

2) Conecte el circuito de la figura b.

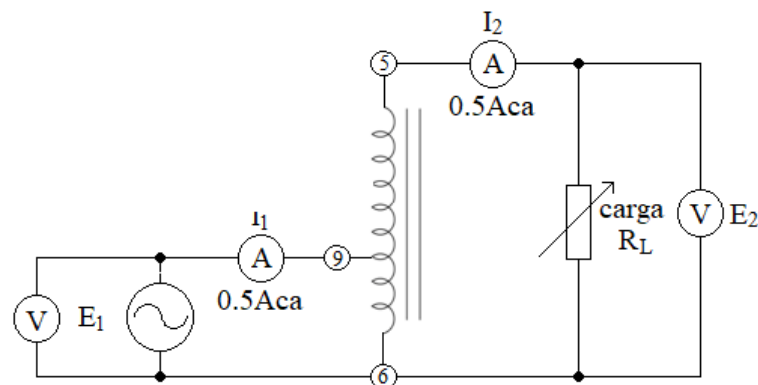


Figura b Autotransformador como elevador.

El devanado de 6 a 9 se conecta ahora como primario, mientras que el devanado de 5 a 6 se utiliza como secundario.

Abra todos los interruptores de la carga resistiva para que la corriente de carga sea 0. Conecte la fuente de energía y ajuste el voltaje E_1 a 60V (E_1 es el voltaje nominal del devanado 6 a 9). Ajuste la resistencia de carga R_L a 600 Ω . Realice mediciones, registre datos y calcule lo que se indica en la tabla b.

Tabla b Corrientes I_1 e I_2 y tensión E_2 . Autotransformador como elevador.

I_1 A	I_2 A	E_2 V	S_1 VA	S_2 VA

Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconéctela (mediante su interruptor).

P2 ¿Son aproximadamente iguales S_1 y S_2 ? Explique.

Si usa el módulo EMS8341 y si se usa la fuente fija de 120V corriente alterna, **P3** ¿cuál devanado usaría como primario y cuál como secundario, para obtener un voltaje de salida de?

- 1 148V corriente alterna
- 2 328V corriente alterna
- 3 224V corriente alterna
- 4 300V corriente alterna

Sugerencias didácticas

El **complemento: Reto 2 parte a y b** puede aplicarse al caso del autotransformador. Una vez resuelto el circuito equivalente para el caso deseado puede utilizarse el **complemento: Reto 1 parte b** para aplicarlo tanto al primario como al secundario con el propósito de analizar el autotransformador en términos de lo que este complemento muestra.

Reporte del equipo:

Ver la rúbrica para evaluar prácticas de laboratorio.

Referencia:

Experimento de laboratorio No. 42 El autotransformador:

Práctica 3

EXPERIMENTOS CON EQUIPO ELÉCTRICO

Theodore Wildi, Michael J. De Vito

Editorial Limusa, México. 1975

Lab-Volt, Sistemas Educativos

Práctica 4

Conexiones de transformadores trifásicos

Objetivos:

- 1 Conexión de transformadores en delta y estrella.
- 2 Estudio de las relaciones de corriente y voltaje.

Material y equipo utilizado

Equipo Lab-Volt

- 1 Módulo de suministro de potencia EMS8821
- 1 Transformador EMS8341
- 1 Transformador trifásico EMS8348

Otros:

- 1 Amperímetro de corriente alterna
- 1 multímetro

Metodología

Objetivo 1

- 1) Conecte el circuito mostrado en la figura a.

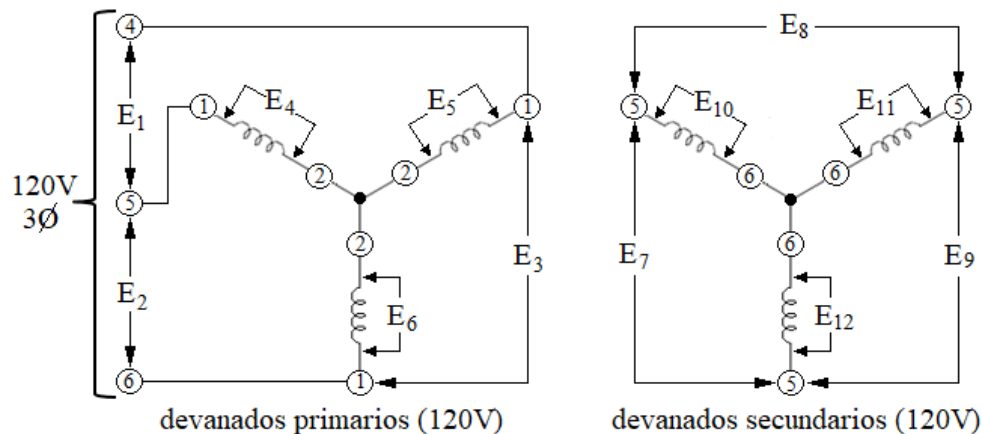


Figura a Transformador trifásico conectado en Y-Y.

La tensión de línea aplicada al primario es $E_L = 120V$. Calcule y registre los valores indicados en la tabla a.

Tabla a Valores calculados. Transformador trifásico conectado en Y-Y. Tensiones de línea y tensiones de fase.

E_1 (V)	E_2 (V)	E_3 (V)
E_4 (V)	E_5 (V)	E_6 (V)
E_7 (V)	E_8 (V)	E_9 (V)
E_{10} (V)	E_{11} (V)	E_{12} (V)

Reduzca a 0 el voltaje de la fuente de alimentación. Conecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor) y ajuste la E_L a 120V. Mida y registre los valores indicados en la tabla **b**.

P1 ¿Considera que es necesario verificar la secuencia de fase para ejecutar las metodologías de la practica de laboratorio?

Tabla **b** Valores medidos. Transformador trifásico conectado en **Y-Y**. Tensiones de línea y tensiones de fase.

E_1 (V)	E_2 (V)	E_3 (V)
E_4 (V)	E_5 (V)	E_6 (V)
E_7 (V)	E_8 (V)	E_9 (V)
E_{10} (V)	E_{11} (V)	E_{12} (V)

Reduzca a cero el voltaje y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor).

2) Conecte el circuito mostrado en la figura **b**.

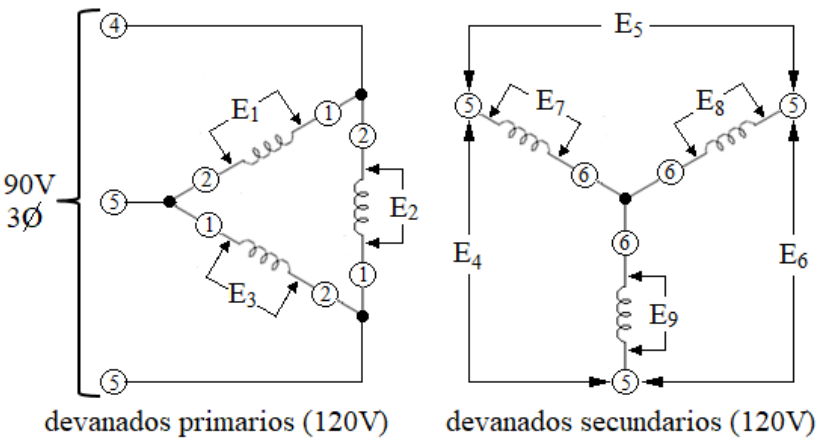


Figura **b** Transformador trifásico conectado en **Δ-Y**.

La tensión de línea aplicada al primario es $E_L = 90V$. Calcule y registre los valores indicados en la tabla **c**.

Tabla **c** Valores calculados. Transformador trifásico conectado en **Δ-Y**. Tensiones de línea y tensiones de fase.

E_1 (V)	E_2 (V)	E_3 (V)
E_4 (V)	E_5 (V)	E_6 (V)
E_7 (V)	E_8 (V)	E_9 (V)

Conecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor) y ajuste la E_L a 90V. Mida y registre los valores indicados en la tabla d.

Tabla d Valores medidos. Transformador trifásico conectado en Δ -Y. Tensiones de línea y tensiones de fase.

E_1 (V)	E_2 (V)	E_3 (V)
E_4 (V)	E_5 (V)	E_6 (V)
E_7 (V)	E_8 (V)	E_9 (V)

Reduzca a cero el voltaje y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor).

3) Conecte el circuito mostrado en la figura c.

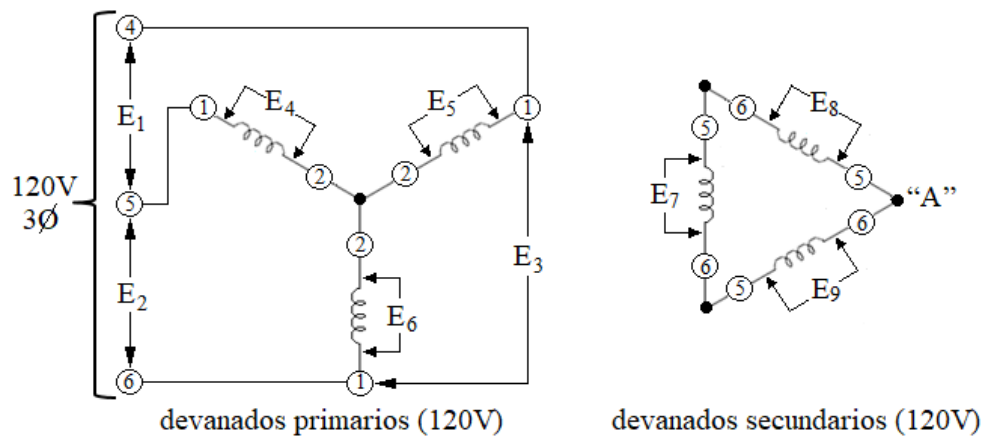


Figura c Transformador trifásico conectado en Y- Δ .

La tensión de línea aplicada al primario es $E_L = 120V$. Calcule y registre los valores indicados en la tabla e.

Tabla e Valores calculados. Transformador trifásico conectado en Y- Δ . Tensiones de línea y tensiones de fase.

E_1 (V)	E_2 (V)	E_3 (V)
E_4 (V)	E_5 (V)	E_6 (V)
E_7 (V)	E_8 (V)	E_9 (V)

Abra el secundario conectado en delta en el punto "A", y coloque un multímetro en el circuito abierto. Active la fuente de alimentación usando su interruptor y ajuste la E_L a 50V. El voltímetro que está conectado a la delta abierta en el punto "A" no debe mostrar un voltaje considerable si las conexiones delta están correctamente establecidas. Sin embargo, podrá haber un pequeño

voltaje que se debe a que, generalmente, los voltajes trifásicos de una fuente trifásica no son exactamente iguales y también habrá ligeras variaciones entre los tres transformadores.

Reduzca a cero el voltaje y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor). Cierre el circuito en delta en el punto “A”.

Conecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor) y ajuste la E_L a 120V. Mida y registre los valores indicados en la tabla f.

Tabla f Valores medidos. Transformador trifásico conectado en Y-Δ. Tensiones de línea y tensiones de fase.

E_1 (V)	E_2 (V)	E_3 (V)
E_4 (V)	E_5 (V)	E_6 (V)
E_7 (V)	E_8 (V)	E_9 (V)

Reduzca a cero el voltaje y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor).

4) Conecte el circuito mostrado en la figura d.

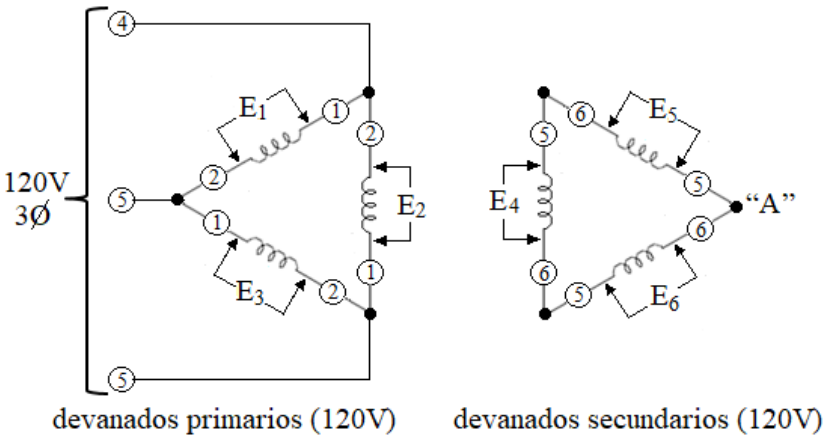


Figura d Transformador trifásico conectado en Δ-Δ.

La tensión de línea aplicada al primario es $E_L = 120V$. Calcule y registre los valores indicados en la tabla g.

Tabla g Valores calculados. Transformador trifásico conectado en Δ-Δ. Tensiones de línea y tensiones de fase.

E_1 (V)	E_2 (V)	E_3 (V)
E_4 (V)	E_5 (V)	E_6 (V)

Abra el secundario conectado en delta en el punto “A”, y conecte un multímetro al circuito abierto. Conecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor) y ajuste la E_L a 50V. El voltímetro conectado a la delta abierta, en el punto “A” no debe indicar ningún voltaje apreciable si las conexiones en delta tienen la fase debida.

Reduzca a cero el voltaje y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor). Cierre el circuito en delta en el punto “A”.

Conecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor) y ajuste la E_L a 120V. Mida y registre los valores indicados en la tabla **h**.

Tabla **h** Valores medidos. Transformador trifásico conectado en Δ - Δ . Tensiones de línea y tensiones de fase.

E_1 (V)	E_2 (V)	E_3 (V)
E_4 (V)	E_5 (V)	E_6 (V)

Reduzca a cero el voltaje y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor).

5) Conecte el circuito de la figura **e**, este circuito tiene 2 transformadores conectados en una configuración Δ abierta.

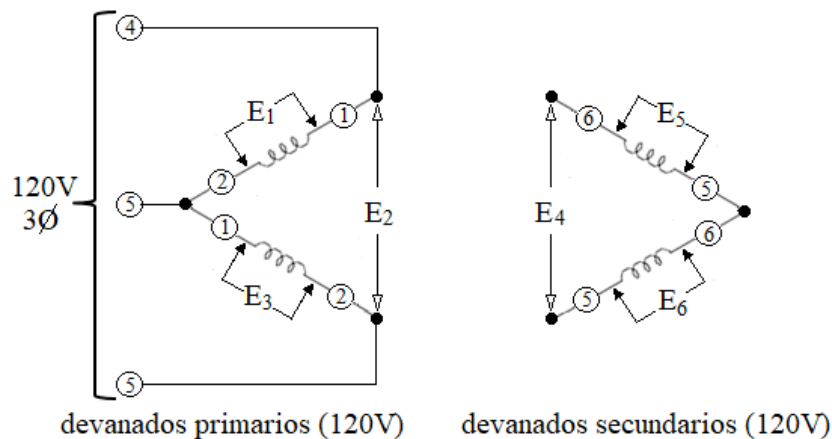


Figura **e** 2 transformadores conectados en una configuración Δ abierta.

La tensión de línea aplicada al primario es $E_L = 120V$. Calcule y registre los valores indicados en la tabla **i**.

Tabla **i** Valores calculados. 2 transformadores conectados en una configuración Δ abierta. Tensiones de línea y tensiones de fase.

E_1 (V)	E_2 (V)	E_3 (V)
E_4 (V)	E_5 (V)	E_6 (V)

Conecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor) y ajuste la E_L a 120V. Mida y registre los valores indicados en la tabla j.

Tabla j Valores medidos. 2 transformadores conectados en una configuración Δ abierta. Tensiones de línea y tensiones de fase.

E_1 (V)	E_2 (V)	E_3 (V)
E_4 (V)	E_5 (V)	E_6 (V)

Reduzca a cero el voltaje y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor).

Compare los resultados de los procedimientos 4 y 5, **P2** ¿hay una diferencia entre la configuración Δ - Δ y la configuración Δ abierta?, **P3** ¿se tiene el mismo valor nominal de VA en la configuración Δ - Δ y en la configuración Δ abierta? Explique.

Si se aumentaran los valores de corriente nominal de cada devanado, **P4** ¿podrían obtenerse tan buenos resultados con la configuración Δ abierta como se tienen con la configuración Δ - Δ ? Explique.

De lo anterior, los transformadores monofásicos se pueden conectar para formar bancos de transformadores trifásicos para elevar o reducir los voltajes de los sistemas trifásicos. Una ventaja de la conexión Δ - Δ es que si un transformador se daña o si es removido de servicio, los dos restantes se pueden operar, en los que se denomina la conexión Δ -abierta, o V . Al operarse de esta manera, el banco sigue suministrando corrientes y voltajes trifásicos en sus correctas relaciones fásicas, pero la capacidad del banco es reducido al 57.7% ($1/\sqrt{3}$) de lo que era con los tres transformadores en servicio. Por lo tanto, el valor nominal en VA de la configuración Δ abierta es únicamente $\frac{1}{\sqrt{3}}$ o 57.7% del valor nominal de la Δ - Δ . Esto debido a que el valor nominal de la corriente de los devanados no puede excederse, y las corrientes de los devanados son también las corrientes de línea en la configuración Δ abierta. Por eso, si E es el voltaje de línea a línea e I es la corriente nominal del devanado secundario, la carga trifásica máxima que se puede suministrar es:

$$\Delta \text{ abierta: } VA_{\text{máximo}} = \sqrt{3} E I \quad \text{a}$$

En la configuración Δ - Δ , las corrientes de línea son $\sqrt{3}$ veces la corriente I nominal del devanado secundario, así que la carga trifásica máxima que se puede suministrar con esta configuración Δ - Δ es:

$$\Delta\text{-}\Delta: VA_{\text{máximo}} = 3 E I \quad \text{b}$$

En la conexión Y - Y , únicamente el 57.7% de voltaje de línea está aplicado sobre cada devanado, pero la corriente de línea completa fluye en cada devanado del transformador. La conexión Y - Y se usa muy poco.

La conexión Δ -Y se adapta bien para elevar voltajes, ya que el voltaje es aumentado por la relación del transformador multiplicado por el factor $\sqrt{3}$.

La conexión Y- Δ se puede usar para reducir los voltajes. Los devanados de alto voltaje de la mayoría de transformadores son conectados en Y.

Objetivo 2

Si cada transformador tiene una capacidad de 60kVA, **P5** ¿cuál es el total de potencia trifásica que se puede obtener en cada una de las 5 configuraciones?

Y-Y

Δ -Y

Y- Δ

Δ - Δ

Δ abierta

Si una de las polaridades del devanado secundario se invirtiera, en la metodología “1)”, **P6** ¿se tendría un cortocircuito directo?, **P7** ¿se calentaría el transformador?, **P8** ¿se desbalancearían los voltajes del primario?, **P9** ¿se desbalancearían los voltajes del secundario?

Si se invirtiera una de las polaridades del devanado secundario en la metodología “4)”, **P10** ¿se produciría un cortocircuito directo?, **P11** ¿se calentaría el transformador?, **P12** ¿se desbalancearían los voltajes del primario?, **P13** ¿se desbalancearían los voltajes del secundario?

Sugerencias didácticas

Antes de ejecutar esta práctica de laboratorio, conecte transformadores en Y- Δ y Δ -Y usando las explicaciones de las figuras 24 y 25. Para estas explicaciones use el transformador trifásico mostrado en la figura f.

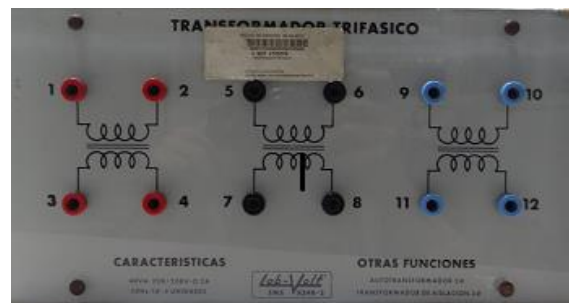


Figura f Transformador trifásico EMS8348 40VA, 208/208, 0.2A, 60Hz, 1 ϕ , 3 unidades.

Reporte del equipo:

Ver la rúbrica para evaluar prácticas de laboratorio.

Referencia:

Experimento de laboratorio No. 48 Conexiones de transformadores trifásicos:

Práctica 4

EXPERIMENTOS CON EQUIPO ELÉCTRICO

Theodore Wildi, Michael J. De Vito

Editorial Limusa, México. 1975

Lab-Volt, Sistemas Educativos

Anexo

Solución de las prácticas de laboratorio

Práctica 1 *Efectos magnéticos*

Discusión de resultados:

Objetivo 1

1)

Corriente directa

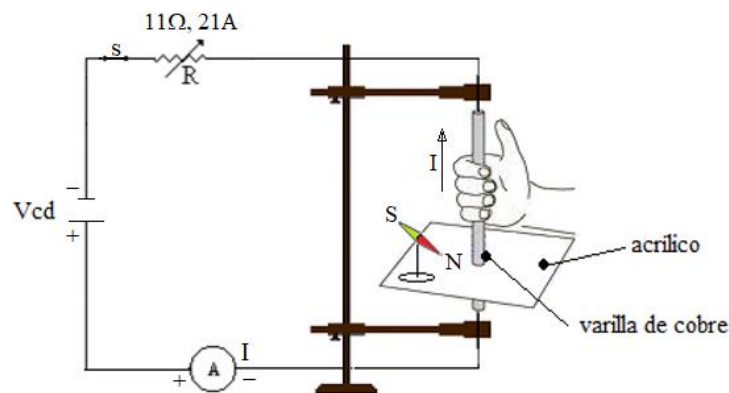


Figura a Experimento de Oersted.

Los cables disponibles en el laboratorio para las conexiones de los circuitos eléctricos soportan máximo 10A (corriente especificada por el fabricante), **P1** ¿Cómo debe conectar dos cables para que el conjunto soporte 20A? **En paralelo.**

P2 ¿Cuál es el calibre de la varilla de cobre? **Calibre 9. El código eléctrico nacional fija una corriente máxima segura de 30A.**

P3 ¿Es posible sujetar con las dos manos la varilla de cobre con el circuito energizado? **Si, la resistencia de la varilla de cobre es en esencia 0 por lo que la diferencia de potencial es en esencia 0V.**

P4 ¿La varilla de cobre es una superficie equipotencial? **Una superficie equipotencial es una superficie para la cual la diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera de esa superficie es 0; por lo tanto, sí.**

P5 ¿Qué condiciones deben cumplirse para evitar un choque eléctrico si por error se toca con una mano la varilla de cobre y con un pie desnudo el piso? **Un tapete de plástico aísla a la persona en contacto con la varilla de cobre, por lo que la condición es estar al potencial de la varilla de cobre, de ninguna manera la persona debe estar expuesta a una diferencia de potencial.**

Corriente alterna

Verifique que R esté en su resistencia máxima. Conecte el circuito de la figura a a una fuente de corriente alterna, energice el circuito cerrando el interruptor s, modifique el valor de R hasta que $I_{rms} = 15A$, **P6** ¿la brújula se orienta? **No**, la frecuencia de la fuente de alimentación es 60Hz, la brújula no puede hacer 60 inversiones por segundo.

Objetivo 2

2)

Corriente directa

Tabla a Valores medidos y calculados. Resistencia ohmica de la bobina. $T_1 = 25^\circ C$

I A	E V	R Ω	R_{T1} Ω
0.75	1.9	2.533	2.659
1.5	4.1	2.733	
2.25	6.1	2.711	

Tabla b Resistencia ohmica de la bobina. $T_2 = 45^\circ C$

R_{T2} Ω
2.8642118

P7 ¿Cuál es el voltaje de corriente directa a aplicar al circuito para que la corriente sea 2.25 A? **6.44447656V**.

Energice el circuito cerrando el interruptor s y verifique que $I = 2.25A$, acerque la punta magnética a uno de los extremos de la bobina y defina el norte de la bobina. **P8** ¿Cómo aplicaría la regla de la mano derecha para determinar la polaridad de la bobina? **El dedo índice indica la polaridad (N) y los demás dedos indican la dirección de la corriente convencional.**

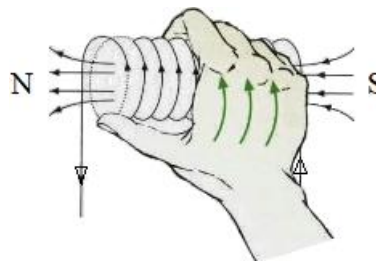


Figura d Aplicación de la regla de la mano derecha para definir la polaridad de una bobina.

Considerando que $I = 2.25A$ abra el interruptor s y vuélvalo a cerrar, observe el efecto en la punta magnética. Ahora, mueva la punta magnética hacia el otro extremo de la bobina para confirmar que existe un campo magnético externo, **P9** ¿Consideraría que el campo magnético interno es cero? **La intensidad del campo magnético interno no es cero. La inducción magnética está definida por la ecuación 3.**

Considerando que $I = 2.25A$, Introduzca el tubo 1 en la bobina, **P10** ¿la corriente I modificó su valor? Solo durante el tiempo en el que el tubo se mueve, él tuvo corta líneas de flujo magnético induciéndose una tensión.

Corriente alterna.

Tabla c Valores medidos y calculados. Cálculo de los parámetros de la bobina.
Caso 1 Bobina sin tubos.

Valores medidos			Valores calculados		
I	P	Q	Re_{T1}	XL	L
A	W	var	Ω	Ω	H
2.25	16	21	3.16049383	4.14814815	0.0110033

Tabla d Valores medidos y calculados. Cálculo de los parámetros de la bobina.
Caso 2 Tubo 1 en el interior de la bobina.

Valores medidos			Valores calculados		
I	P	Q	Re_{T1}	XL	L
A	W	var	Ω	Ω	H
2.25	17	34	3.35802469	6.71604938	0.01781487

Tabla e Valores medidos y calculados. Cálculo de los parámetros de la bobina.
Caso 3 Tubo 1 y 2 en el interior de la bobina (el tubo 2 encima del tubo 1).

Valores medidos			Valores calculados		
I	P	Q	Re_{T1}	XL	L
A	W	var	Ω	Ω	H
2.25	18.5	41	3.65432099	8.09876543	0.02148264

Si el circuito se energiza con corriente alterna, **P11** ¿la polaridad cambia? Si. Si la punta magnética se aproxima a cualquiera de los extremos de la bobina **P12** ¿El imán gira? Si, el imán de la punta magnética está montado sobre un pivote que le permite girar libremente.

Considerando los valores medidos y calculados de las tablas c, d y e, **P13** ¿consideraría que la intensidad del campo magnético que produce la bobina es la misma? No. La intensidad del campo magnético se va incrementando para la misma corriente, la permeabilidad del núcleo va cambiando.

P14 ¿La bobina produce ruido? Si. Las partículas dentro del conductor oscilan produciéndose fuerzas de atracción y repulsión lo que implica que los conductores vibren produciéndose modelos de sonido.

Objetivo 3

3)

Tabla f Dirección de la fuerza.

Hacia la izquierda	Hacia la derecha
	✓

Verifique que R esté en su resistencia máxima. Energice el circuito cerrando el interruptor s, modifique el valor de R hasta que $I = 1.5A$. Considerando que $I = 1.5A$ abra el interruptor s y vuélvalo a cerrar, observe el efecto en el conductor, **P15** ¿Por qué el conductor suspendido de las cintas sustentadoras debe ser de Al? **Un material más pesado no permitiría observar con facilidad el efecto. Es posible utilizar por ejemplo cobre, sin embargo, la corriente I debe ser por mucho más grande que 1.5A.**

Abra el interruptor s e intercambie los cables conectados al conductor, cierre el interruptor s y observe el efecto en el conductor, **P16** ¿La dirección del movimiento cambió? **Si.**

Intercambie la posición del imán, **P17** ¿La dirección del movimiento cambió? **Si.**

P18 ¿Cuál es su predicción si el circuito se energiza con corriente alterna? **Los experimentos muestran que si la dirección de la corriente cambia, entonces la dirección de la fuerza cambia. Considerando que $f = 60Hz$, habrá 60 inversiones cada segundo. Ahora, el conductor tiene una inercia, debido a esto el conductor no oscila como podría esperarse. Si la frecuencia tiende a 0 es posible observar inversiones en el conductor.**

Objetivo 4

4)

Con el propósito de observar el efecto la corriente que circulará por el circuito será de 10A, **P19** ¿Cuál debe ser el calibre de los conductores de cobre? **Calibre 15.**

Corriente directa.

Verifique que R esté en su resistencia máxima. Conecte el borne + al 1, el 2 al 3 y termine con el 4 al borne -. Energice el circuito cerrando el interruptor s, modifique el valor de R hasta que $I = 10A$. Considerando que $I = 10A$ abra el interruptor s y vuélvalo a cerrar, observe el efecto en los conductores, **P20** ¿la fuerza es de atracción o de repulsión? **Atracción.**

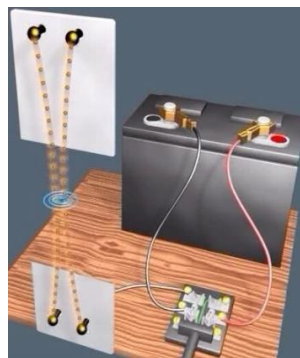


Figura g Las dos corrientes llevan la misma dirección por lo que la fuerza es de atracción.

No modifique el valor de la resistencia R. Ahora conecte el borne + al 1, el 2 al 4 y termine con el 3 al borne -. Energice el circuito cerrando el interruptor s, considerando que $I = 10A$ abra el interruptor s y vuélvalo a cerrar, observe el efecto en los conductores, **P21** ¿la fuerza es de atracción o de repulsión? **Repulsión.**

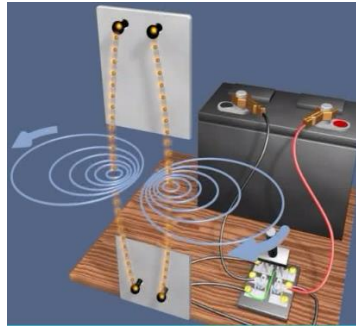


Figura h Las corrientes llevan dirección contraria por lo que la fuerza es de repulsión.

Intercambie las terminales en la fuente de alimentación y cierre el interruptor s, **P22** ¿la fuerza es de atracción o de repulsión? **La dirección de la corriente cambió en ambos conductores por lo que la fuerza es de repulsión.**

Corriente alterna.

Verifique que R esté en su resistencia máxima. Conecte el circuito de la figura d a una fuente de corriente alterna, energice el circuito cerrando el interruptor s, modifique el valor de R hasta que $I_{rms} = 10A$, **P23** ¿Cuál es su predicción si el circuito se energiza con corriente alterna? **Los conductores no se desplazan, P24** ¿consideraría que los conductores vibran? **Si, la vibración aumenta a medida que la corriente aumenta.**

Objetivo 5

5)

P25 ¿La deflexión de la aguja fue hacia la izquierda o hacia la derecha? **Hacia la derecha.**

Ahora, desplace el imán de neodimio en sentido contrario, **P26** ¿La deflexión de la aguja fue hacia la izquierda o hacia la derecha? **Hacia la izquierda.**

Si el imán se desplaza en ambas direcciones, **P27** ¿consideraría que se induce en la bobina corriente alterna? **Si.**

Gire el imán 90° y acérquelo o aléjelo de la bobina, **P28** ¿se induce tensión en la bobina? **No. La bobina no corta líneas de flujo magnético.**

Considere la figura i. Emplee el motor a pasos mostrado en la figura j (el motor tiene acoplado un imán de neodimio en su eje) y use el **complemento: Práctica 4 Tema 5** para hacer girar el motor a pasos a diferentes velocidades y observe el instrumento de medición, **P29** ¿se induce en la bobina corriente alterna? **Si. P30** ¿la tensión inducida aumenta con la velocidad? **Si.**

Invierta el sentido de rotación del motor paso a paso, **P31** ¿cambió la polaridad de la tensión inducida? **Si**.

Use el arreglo de la figura **h**. Conecte la bobina 1 a una fuente de alimentación de corriente alterna y aplique tal tensión que haga que la corriente en la bobina sea $I_{rms} = 0.8$ A. Ahora, conecte la bobina 2 al galvanómetro, **P32** ¿la aguja se desplazó hacia un lado y hacia otro? **No**. La frecuencia de la fuente de alimentación es 60Hz, la inercia del sistema motor no permite que la aguja se desplace. Reemplace el galvanómetro por cualquiera de los 2 leds, **P33** ¿el led enciende? **Si**. El led se polariza en directa y posteriormente en inversa y puesto que la frecuencia es 60Hz el led enciende.

Práctica 2 El transformador

Discusión de resultados:

Objetivo 1

1)

Tabla b Valores calculados. i), ii), iii) y iv).

E_1		E_2		Z_2	
V	$\angle^\circ$	V	Ref ($\angle^\circ$)	Ω	$\angle^\circ$
98.615	0	6.41	0	3.438	5.281

Z_2'		P_1	Q_1
Ω	$\angle^\circ$	W	var
813.757	5.281	11.9	1.1

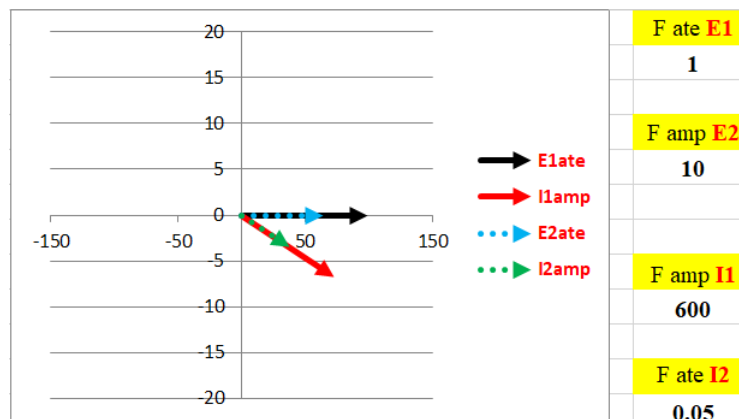


Figura c Diagrama fasorial para el transformador ideal.

2)

Tabla c Valores medidos. Tensión aplicada al transformador, corrientes y potencias.

I_2	V_2	P_2	Q_2
A	V	W	var
1.9	6.41	11.9	1.1
V_1	I_1	P_1	Q_1
V	A	W	var
100	0.14	17	8.4

Objetivo 2

3)

Tabla d Valor calculado y valores medidos. Prueba de cortocircuito.

I_1	V_1	P_1
A	V	W
1.17	12	1.54

Tabla e Valores medidos. Prueba de circuito abierto.

E_2	I_2	P_2
V	A	W
6.5	1.21	4

Tabla f Valor calculado. Impedancia equivalente Z_{eq1} .
(despreciando la admitancia en derivación).

Z_{eq1}	
Ω	$\angle^\circ$
10.256	83.702

Tabla g Valor calculado. Admitancia en derivación Y_m
(despreciando la impedancia en serie).

Y_m	
Ω^{-1}	$\angle^\circ$
0.000786	-59.430

Objetivo 3

3)

Tabla h Valor calculado. Impedancia del primario e impedancia del secundario.

Z_p		Z_s'		Z_s	
Re Z_p	Im Z_p	Re Z_s'	Im Z_s'	Re Z_s	Im Z_s
Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω
0.843	7.645	0.281	2.548	0.00118	0.0107

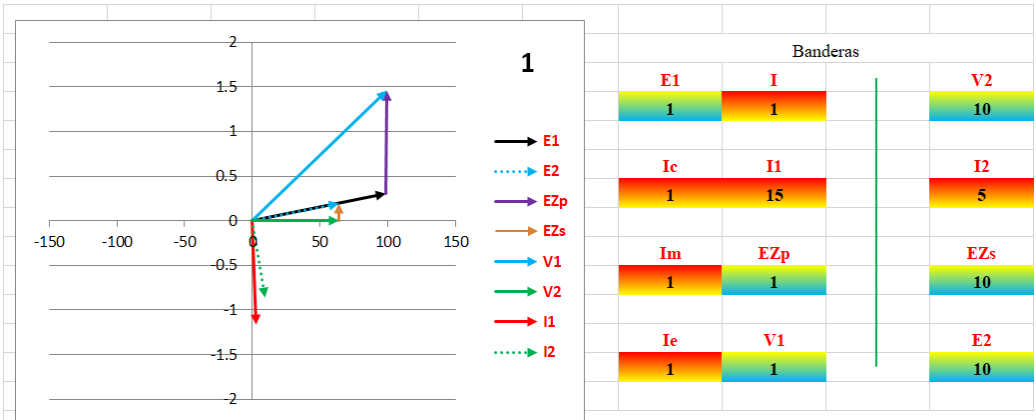


Figura d Diagrama fasorial 1. Transformador real.

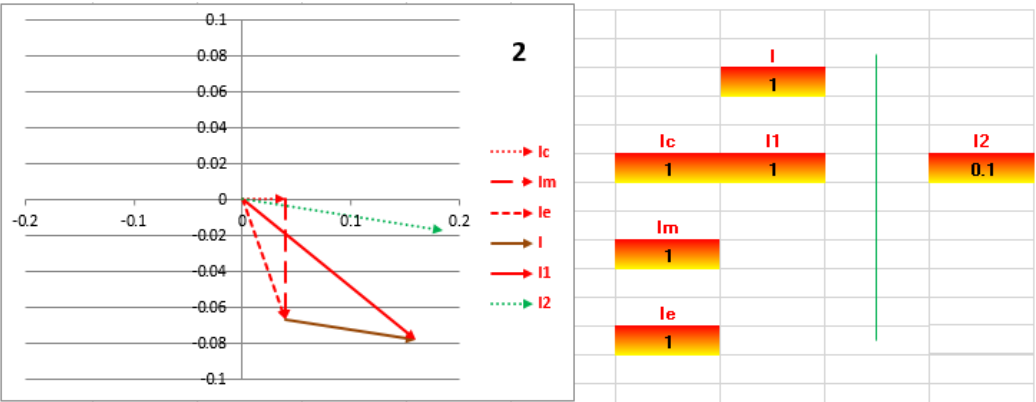


Figura e Diagrama fasorial 2. Transformador real.

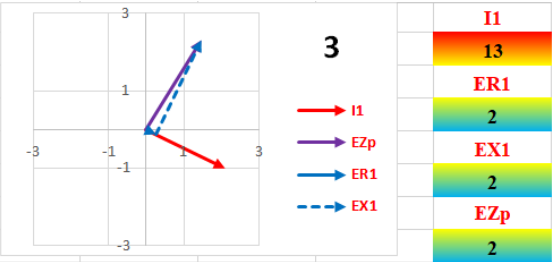


Figura f Diagrama fasorial 3. Transformador real.

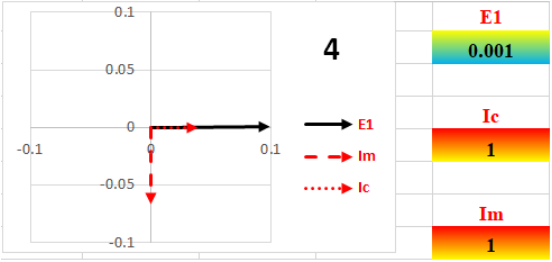


Figura g Diagrama fasorial 4. Transformador real.

Tabla i Solución del circuito equivalente del transformador.

1	E_{Zs}	
	V	∠°
	0.020	78.421
2	E₂	
	V	∠°
	6.414	0.176
3	E₁	
	V	∠°
	98.678	0.176
4	I_c	
	A	∠°
	0.039	0.176
5	I_m	
	A	∠°
	0.066	-89.823
6	I_e	
	A	∠°
	0.077	-59.253
7	I	
	A	∠°
	0.121	-5.281
8	I₁	
	A	∠°
	0.178	-25.898
9	E_{Zp}	
	V	∠°
	1.371	57.804
10	V₁	
	V	∠°
	99.419	0.844

Objetivo 4

4)

Tabla j % de regulación de tensión del transformador real.

% reg ten primario	% reg ten secundario
0.580	1.384

Experimento adicional:

Carga resistiva

Tabla **k** Valores medidos y valor calculado. % de regulación de tensión con carga resistiva.

Carga resistiva	I ₂ A	E ₂ V	I ₁ A	% reg ten	S ₂ VA
∞	0	120	0.02	0	0
1200	0.100	119	0.100	0.83333333	11.9
600	0.190	117	0.200	2.5	22.23
400	0.285	115	0.290	4.16666667	32.775
300	0.380	112.5	0.395	6.25	42.75
240	0.475	110	0.480	8.33333333	52.25

Carga inductiva

Tabla **l** Valores medidos y valor calculado. % de regulación de tensión con carga inductiva.

Carga inductiva	I ₂ A	E ₂ V	I ₁ A	% reg ten	S ₂ VA
∞	0	120	0.020	0	0
1200	0.100	118	0.105	1.66666667	11.8
600	0.197	115	0.202	4.16666667	22.655
400	0.290	112	0.300	6.66666667	32.48
300	0.370	110	0.375	8.33333333	40.7
240	0.450	108	0.460	10	48.6

Carga capacitiva

Tabla **m** Valores medidos y valor calculado. % de regulación de tensión con carga capacitiva.

Carga capacitiva	I ₂ A	E ₂ V	I ₁ A	% reg ten	S ₂ VA
∞	0	120	0.020	0	0
1200	0.110	122	0.080	-1.66666667	13.42
600	0.230	125	0.220	-4.16666667	28.75
400	0.330	127	0.310	-5.83333333	41.91
300	0.445	130	0.425	-8.33333333	57.85
240	0.530	132	0.500	-10	69.96

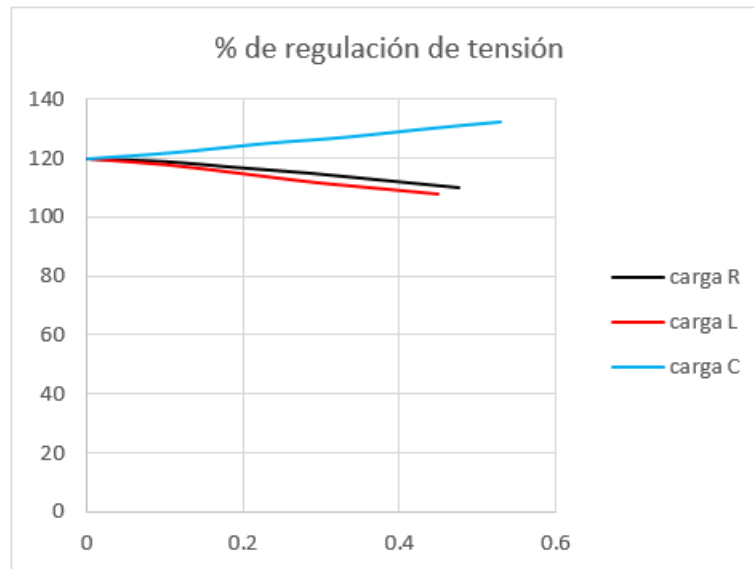


Figura 1 E_2 vs I_2 para cada tipo de carga del transformador.

Objetivo 5

5)

Tabla n Pérdidas en cada impedancia del transformador.

P1	Q1
W	var
15.8258952	7.974397226
PR1	QX1
W	var
0.0268083	0.242933418
P1 - PR1	Q1 - QX1
W	var
15.7990869	7.731463808
PGc	QBm
W	var
3.89495653	6.594034939
P1-PR1-PGc	Q1-QX1-QBm
W	var
11.9041304	1.137428869

P2	Q2
W	var
11.9	1.1
PR2	QX2
W	var
0.00413037	0.037428869
P2 + PR2	Q2 + QX2
W	var
11.9041304	1.137428869

Tabla o Pérdidas en el transformador.

P	Q
W	var
3.92589519	6.874397226

Tabla p % de regulación de tensión del transformador.

η %
75.193

Práctica 3 *El autotransformador*

Discusión de resultados:

Objetivo 1 y 2

1)

Tabla a Corrientes I_1 e I_2 y tensión E_2 . Autotransformador como reductor.

I_1 A	I_2 A	E_2 V	S_1 VA	S_2 VA
0.25	0.49	58	30	28.42

P1 ¿Son aproximadamente iguales S_1 y S_2 ? **Si.** Las potencias del primario y del secundario son iguales cuando se deja margen para las pérdidas debidas a la corriente de excitación I_e .

2)

Tabla b Corrientes I_1 e I_2 y tensión E_2 . Autotransformador como elevador.

I_1 A	I_2 A	E_2 V	S_1 VA	S_2 VA
0.41	0.195	119	24.6	23.2

P2 ¿Son aproximadamente iguales S_1 y S_2 ? **Si.**

Si usa el módulo EMS8341 y si se usa la fuente fija de 120V corriente alterna, **P3** ¿cuál devanado usaría como primario y cuál como secundario, para obtener un voltaje de salida de:?

- 1 148V corriente alterna
Primario: 1 a 2
Secundario: 1 a 4. El devanado de 28V (8 a 4) en serie con el devanado 1 a 2.
- 2 328V corriente alterna
Primario: 1 a 2
Secundario: 1 a 4. El devanado de 104V (3 a 7) en serie con el devanado de 76V (7 a 8) en serie con el devanado de 28V (8 a 4) en serie con el devanado 1 a 2.
- 3 224V corriente alterna
Primario: 1 a 2
Secundario: 1 a 7. El devanado de 104V (3 a 7) en serie con el devanado 1 a 2.
- 4 300V corriente alterna
Primario: 1 a 2
Secundario: 1 a 8. El devanado de 104V (3 a 7) en serie con el devanado de 76V (7 a 8) en serie con el devanado 1 a 2.

Práctica 4

Conexiones de transformadores trifásicos

Discusión de resultados:

Objetivo 1

1)

Tabla a Valores calculados. Transformador trifásico conectado en Y-Y. Tensiones de línea y tensiones de fase.

E ₁ (V)	E ₂ (V)	E ₃ (V)
120	120	120
E ₄ (V)	E ₅ (V)	E ₆ (V)
69.282	69.282	69.282
E ₇ (V)	E ₈ (V)	E ₉ (V)
120	120	120
E ₁₀ (V)	E ₁₁ (V)	E ₁₂ (V)
69.282	69.282	69.282

P1 ¿Considera que es necesario verificar la secuencia de fase para ejecutar las metodologías de la practica de laboratorio? **No. Los resultados son iguales para una secuencia de fase positiva o negativa.**

Tabla b Valores medidos. Transformador trifásico conectado en Y-Y. Tensiones de línea y tensiones de fase.

E ₁ (V)	E ₂ (V)	E ₃ (V)
120	120	120
E ₄ (V)	E ₅ (V)	E ₆ (V)
69	69	69
E ₇ (V)	E ₈ (V)	E ₉ (V)
120	120	120
E ₁₀ (V)	E ₁₁ (V)	E ₁₂ (V)
69	69	69

2)

Tabla c Valores calculados. Transformador trifásico conectado en Δ-Y. Tensiones de línea y tensiones de fase.

E ₁ (V)	E ₂ (V)	E ₃ (V)
90	90	90
E ₄ (V)	E ₅ (V)	E ₆ (V)
155.884	155.884	155.884
E ₇ (V)	E ₈ (V)	E ₉ (V)
90	90	90

Tabla d Valores medidos. Transformador trifásico conectado en Δ -Y. Tensiones de línea y tensiones de fase.

E ₁ (V)	E ₂ (V)	E ₃ (V)
89	90	90
E ₄ (V)	E ₅ (V)	E ₆ (V)
153	153	153
E ₇ (V)	E ₈ (V)	E ₉ (V)
89	90	90

3)

Tabla e Valores calculados. Transformador trifásico conectado en Y- Δ . Tensiones de línea y tensiones de fase.

E ₁ (V)	E ₂ (V)	E ₃ (V)
120	120	120
E ₄ (V)	E ₅ (V)	E ₆ (V)
69.282	69.282	69.282
E ₇ (V)	E ₈ (V)	E ₉ (V)
69.282	69.282	69.282

Tabla f Valores medidos. Transformador trifásico conectado en Y- Δ . Tensiones de línea y tensiones de fase.

E ₁ (V)	E ₂ (V)	E ₃ (V)
120	120	120
E ₄ (V)	E ₅ (V)	E ₆ (V)
69	69	69
E ₇ (V)	E ₈ (V)	E ₉ (V)
69	69	69

4)

Tabla g Valores calculados. Transformador trifásico conectado en Δ - Δ . Tensiones de línea y tensiones de fase.

E ₁ (V)	E ₂ (V)	E ₃ (V)
120	120	120
E ₄ (V)	E ₅ (V)	E ₆ (V)
120	120	120

Tabla h Valores medidos. Transformador trifásico conectado en Δ - Δ . Tensiones de línea y tensiones de fase.

E ₁ (V)	E ₂ (V)	E ₃ (V)
120	120	120
E ₄ (V)	E ₅ (V)	E ₆ (V)
120	120	120

5)

Tabla i Valores calculados. 2 transformadores conectados en una configuración Δ abierta.

Tensiones de línea y tensiones de fase.

E_1 (V)	E_2 (V)	E_3 (V)
120	120	120
E_4 (V)	E_5 (V)	E_6 (V)
120	120	120

Tabla j Valores medidos. 2 transformadores conectados en una configuración Δ abierta. Tensiones de línea y tensiones de fase.

E_1 (V)	E_2 (V)	E_3 (V)
120	120	120
E_4 (V)	E_5 (V)	E_6 (V)
120	120	120

Compare los resultados de los procedimientos 4 y 5, **P2** ¿hay una diferencia entre la configuración Δ - Δ y la configuración Δ abierta?, No. **P3** ¿se tiene el mismo valor nominal de VA en la configuración Δ - Δ y en la configuración Δ abierta? No.

$$\text{Carga máxima } \Delta\text{-}\Delta = \sqrt{3} E \sqrt{3} I = 3 E I$$

$$\text{Carga máxima } \Delta\text{-abierta} = \sqrt{3} E I = \sqrt{3} E I$$

Si se aumentaran los valores de corriente nominal de cada devanado, **P4** ¿podrían obtenerse tan No. En la práctica, hasta con una carga balanceada, los voltajes del secundario serían desbalanceados en condiciones de carga, debido a la caída de voltaje a través de los dos devanados secundarios.

Objetivo 2

Si cada transformador tiene una capacidad de 60kVA, **P5** ¿cuál es el total de potencia trifásica que se puede obtener en cada una de las 5 configuraciones?

Y-Y

La capacidad total es la suma de cada una las tres capacidades del transformador.
 $3 \times 60\text{KVA} = 180\text{KVA}.$

Δ -Y

La capacidad total es la suma de cada una las tres capacidades del transformador.
 $3 \times 60\text{KVA} = 180\text{KVA}.$

Y- Δ

La capacidad total es la suma de cada una las tres capacidades del transformador.
 $3 \times 60\text{KVA} = 180\text{KVA}.$

Δ - Δ

La capacidad total es la suma de cada una las tres capacidades del transformador.

$$60\text{KVA} + 60\text{KVA} + 60\text{KVA} = 180\text{KVA}.$$

Se obtiene el mismo resultado si se la ecuación b ($3 \times 60\text{KVA} = 180\text{KVA}$).

Δ abierta

Dos transformadores, cada uno del valor nominal de 60KVA (usando la ecuación a) pueden suministrar en total de $\frac{1}{\sqrt{3}}(3)(60\text{KVA}) = \sqrt{3}(60\text{KVA}) = 104\text{KVA}$.

Si una de las polaridades del devanado secundario se invirtiera, en la metodología “1”, **P6** ¿se tendría un cortocircuito directo? **No. P7** ¿se calentaría el transformador? **No. P8** ¿se desbalancearían los voltajes del primario? **No. P9** ¿se desbalancearían los voltajes del secundario? **Si. Los voltajes del secundario y también los ángulos de fase se desbalancearían.**

Si se invirtiera una de las polaridades del devanado secundario en la metodología “4”, **P10** ¿se produciría un cortocircuito directo? **Si. P11** ¿se calentaría el transformador? **Si. P12** ¿se desbalancearían los voltajes del primario? **No. P13** ¿se desbalancearían los voltajes del secundario? **No. Los voltajes del secundario no se desbalancearían, pero probablemente bajarían sus valores debido a la carga pesada en la fuente de potencia.**

Proyecto de asignatura con relación de competencias. Incluye rúbrica de evaluación.

Diseño del proyecto de asignatura

Asignatura “Máquinas Eléctricas”

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Proyecto de asignatura. Este complemento educacional inicia al finalizar el tema 1 y se propone para obtener la calificación del examen escrito del **Tema 4**. El proyecto de asignatura a desarrollar para esta propuesta de trabajo es un prototipo de un motor de inducción trifásico elemental. El proyecto de asignatura se presenta al finalizar el **Tema 4**.

Competencias:

- Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica
- Capacidad de comunicación oral y escrita
- Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas
- Habilidades interpersonales y
- Capacidad de trabajo en equipo

Prototipo de un motor de inducción trifásico elemental

Objetivo:

- 1 Construir un prototipo de un motor de inducción trifásico elemental.

Material y equipo utilizado

1 Bote de aluminio de 9cm de altura y 3.5cm de diámetro
1 Barra de soldadura 1/8”
6 Plug hembra
1 tramo de cable de 1m
1 base de mdf de 28cm X 15cm X 1cm
4 Tornillo de 1/4” X 1” con tuerca
600 gr de alambre magneto cal 24

Otros

Taladro

Brocas (diferentes medidas)

Metodología

Objetivo 1

La figura [a](#) muestra el prototipo a construir.



Figura a Motor de inducción trifásico elemental.

a) Construya el molde a usar para devanar las 3 bobinas (figura b).

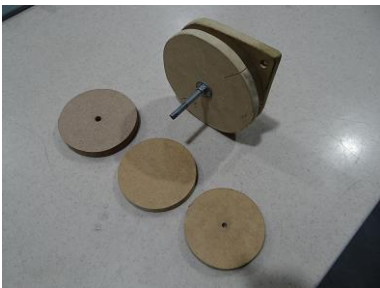


Figura b Molde para construir las 3 bobinas.

b) La dimensión de cada círculo debe ser tal que las 3 bobinas queden colocadas como se indica en la figura c. Construya las bobinas (cada bobina tiene 500 vueltas).



Figura c Disposición de las bobinas del prototipo. El giro de las bobinas está restringido por la longitud de los cables de conexión.

Muestre en la tabla i las dimensiones de las bobinas.

Tabla i Diámetro de las bobinas.

Diámetro interno de la bobina 1 cm	Diámetro interno de la bobina 2 cm	Diámetro interno de la bobina 3 cm

- c) Inserte la varilla en las bobinas, ensamble el prototipo y cablee.

Sugerencias didácticas

Analizar y comprender el **complemento: Reto 1 y 2 Tema 4** es fundamental para el análisis del prototipo motor de inducción trifásico elemental.

Reporte del equipo:

Ver la rúbrica para evaluar el proyecto de asignatura.

Rúbrica para evaluar el proyecto de asignatura

Portada

La portada debe contener:

1. Nombre de la institución
2. Carrera
3. Número y nombre la práctica
4. Nombre de los estudiantes
5. Nombre del profesor
6. Fecha de entrega

En el encabezado aparece mi nombre, esto es así porque un servidor diseño la propuesta. Cuando ustedes envíen su documento deberán quitar mi nombre e incluir el encabezado (si desean incluirlo), pie de página (si desean incluirlo), logotipos (si desean incluirlos).

El proyecto de asignatura se ejecuta en equipo

Objetivos

Incluir el objetivo indicado en el proyecto de asignatura.

Material y equipo

Incluir la lista indicada en el proyecto de asignatura.

Ejecución del proyecto y ensamble

Construcción del molde y bobinas, ensamblado y cableado (calidad del proyecto).

30%

Revisión:

El análisis del prototipo se solicita en el **complemento: Práctica 1 Tema 4 Objetivo 1**. Para el análisis del **objetivo 1 Práctica 1 Tema 4** es necesario el apoyo del profesor para el uso del **complemento: Reto 2 Tema 4**.

60%

El 60% de esta sección se obtendrá de la siguiente manera:

1 El profesor revisa y corrobora la información contenida en la sección discusión de resultados y conclusiones del **complemento: Práctica 1 Tema 4 Objetivo 1**.

2 El equipo presenta su proyecto a sus compañeros y profesor.

Si el prototipo funciona el profesor ofrece la calificación de esta sección a los equipos de trabajo considerando los puntos 1 y 2 (si el prototipo no funciona no se obtiene la calificación de esta sección).

Conclusiones

La conclusión es sobre la construcción del prototipo. Debe ser redactada en un párrafo de 5 renglones completos (el espaciamiento, tamaño y tipo de letra a considerar es: espacio sencillo, 10 arial o times new roman).

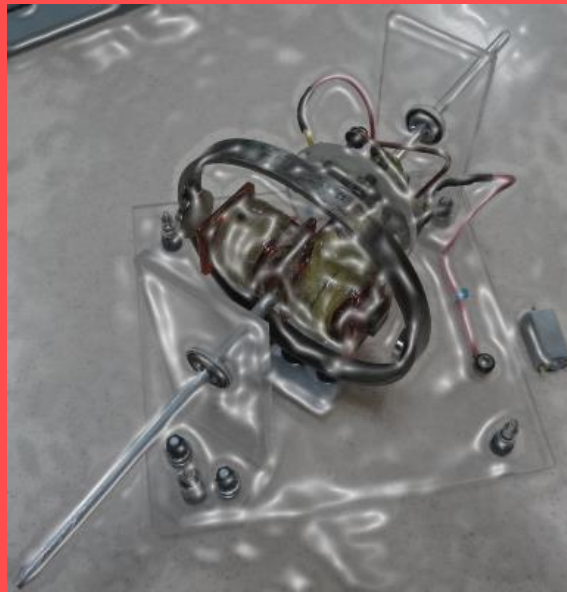
10%

El equipo de trabajo entrega su reporte al profesor (funcionando o no el prototipo).

El profesor ofrece la calificación del examen teórico del **Tema 4** a través de la entrega del reporte al equipo.

Tema 2

"Máquinas de corriente directa"



2.1 Componentes de las máquinas de corriente directa

Las máquinas que operan con corriente directa se dividen en dínamo (generadores) y motores de corriente directa.

La figura 1 muestra la máquina de corriente directa como generador y como motor.

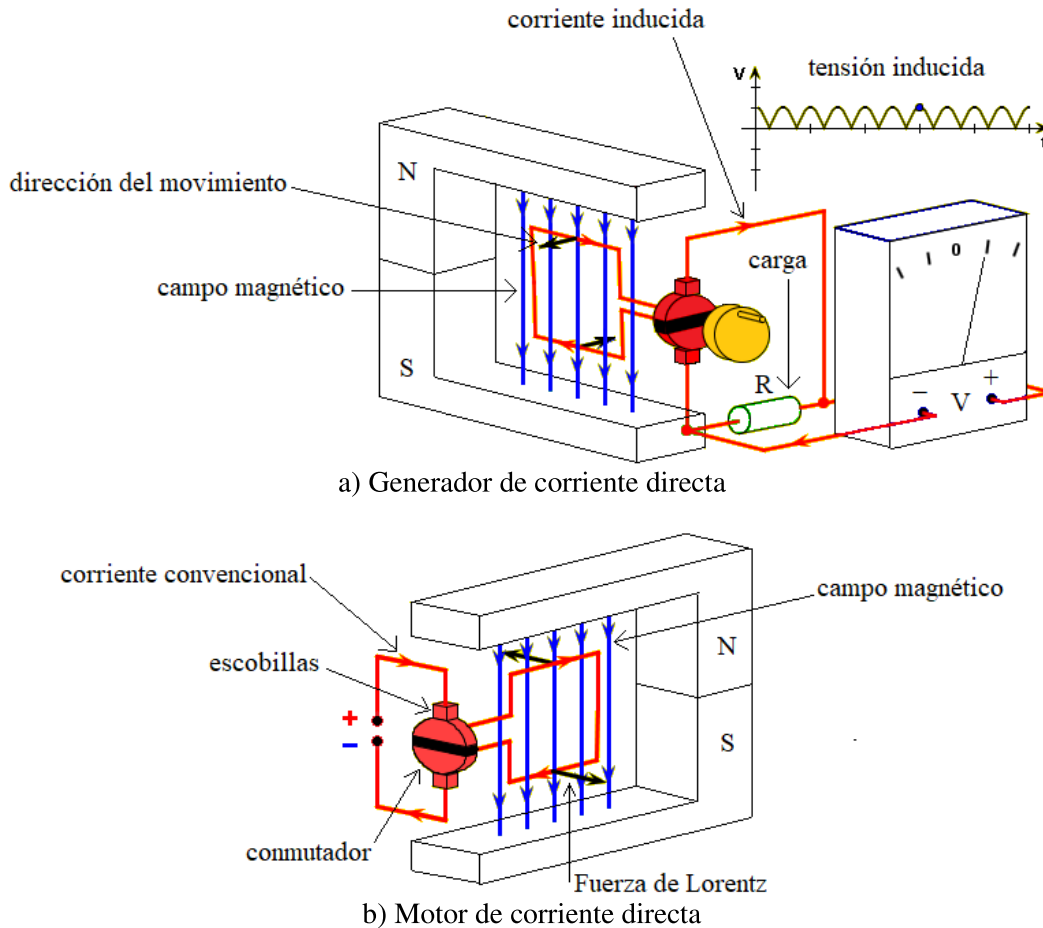


Figura 1 La máquina de corriente directa como generador y como motor.

“Todas las máquinas eléctricas se componen de un sistema apto a producir un campo magnético llamado sistema inductor y de un sistema apto a sufrir la acción del campo inductor llamado sistema inducido”

El generador de corriente directa debe ser impulsado mecánicamente a fin de que produzca electricidad.

Si hacemos trabajar a un generador en reversa, podemos convertir energía eléctrica en energía mecánica, tenemos lo que se llama un motor.

La máquina de corriente continua consiste en un rotor, que se llama armadura, y un estator. El estator tiene uno o más bobinados por cada polo. Estos devanados están hechos para transportar corrientes directas y generar un campo magnético.

2.2 Principio operacional de las máquinas de corriente directa como generador y como motor

Generador de voltaje de corriente alterna

El generador de corriente alterna puede ser esquematizado como una espira conductora que gira en un campo magnético uniforme (figura 2).

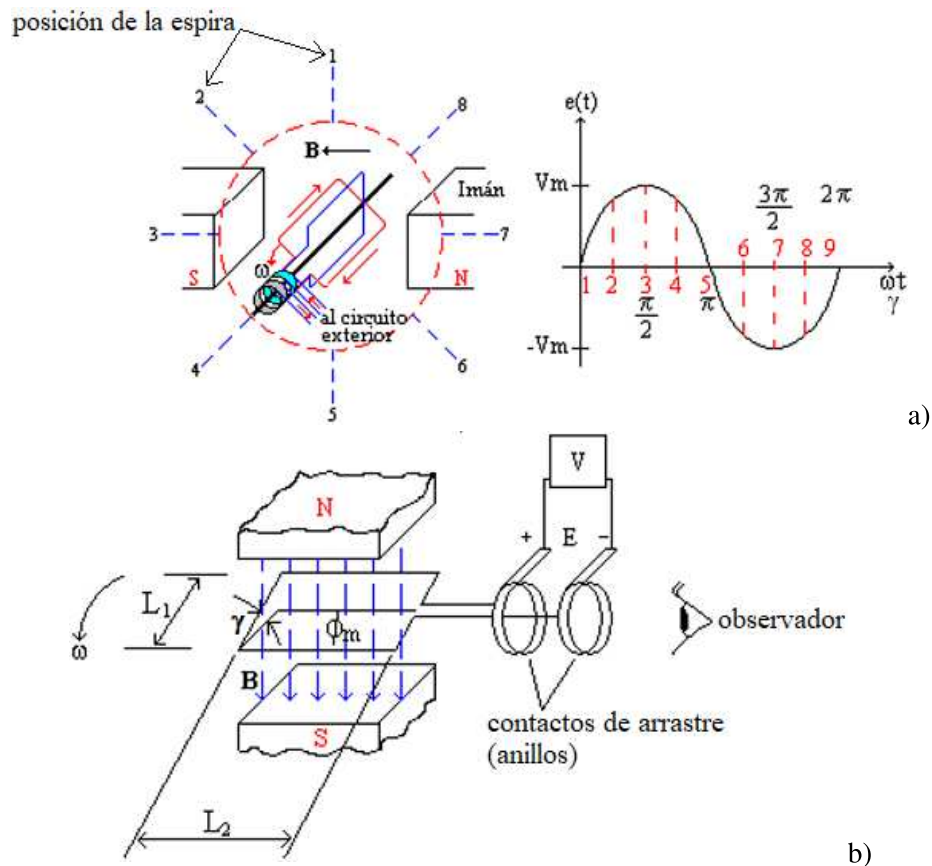


Figura 2 Generador elemental de corriente alterna.

Todas las máquinas eléctricas, tanto las de corriente directa como las de corriente alterna, funcionan según los mismos principios básicos y solo unas pocas leyes fundamentales gobiernan el comportamiento de estas máquinas.

Considerando la figura 2 el flujo magnético enlazado por la espira es:

$$\phi_m(t) = B L_1 L_2 \cos \omega t = B L_1 L_2 \cos \gamma \quad 1$$

El flujo que atraviesa la bobina resulta máximo cuando el plano de la bobina es horizontal con respecto a la dirección del ϕ_m y mínimo cuando dicho plano es vertical (figura 2b). Utilizando la ley de Faraday la fuerza electromotriz inducida $e(t)$ es:

$$e(t) = -N \frac{d(BL_1 L_2 \cos \omega t)}{dt} = NBL_1 L_2 \omega \sin \omega t = E_m \sin \omega t \quad 2$$

En la figura 3 γ tiende a 360° o tiende a 0° (posición 1), el flujo enlazado tiende al valor máximo, el corte de líneas de flujo magnético tiende a 0 por lo que la tensión inducida tiende a 0V. Observe como para este instante de tiempo la corriente cambia de dirección.

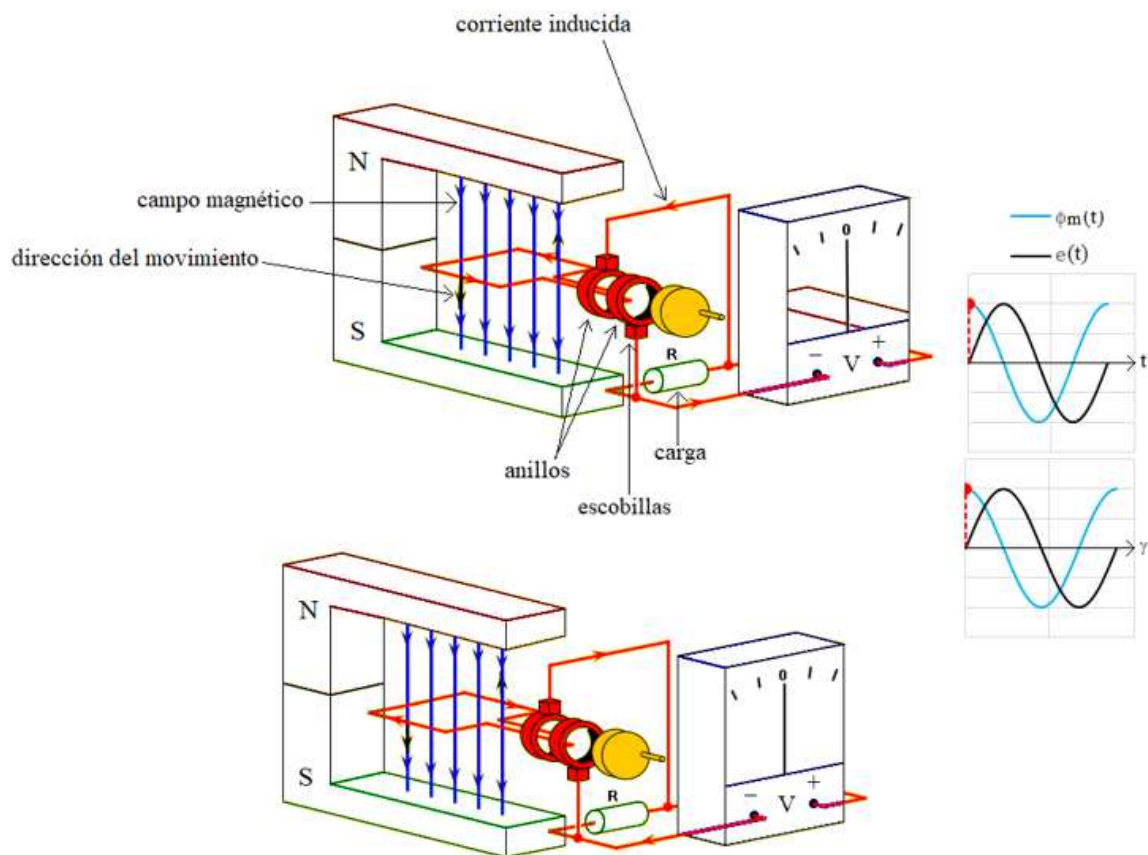


Figura 3 γ tiende a 360° o tiende a 0° , el flujo enlazado tiende al valor máximo (posición 1), el corte de líneas de flujo magnético tiende a 0 por lo que la tensión inducida tiende a 0V. Para este instante de tiempo la corriente cambia de dirección.

A medida que la bobina gira ($\gamma = 45^\circ$) el flujo enlazado disminuye (posición 2), la bobina corta líneas de flujo magnético y la tensión se incrementa hacia el valor máximo positivo (figura 4).

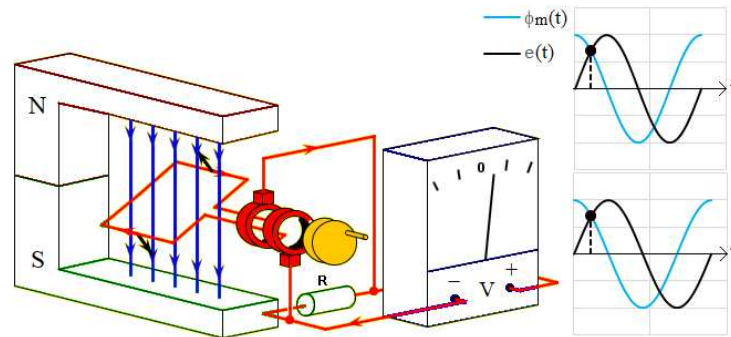


Figura 4 Si $\gamma = 25^\circ$, el flujo enlazado disminuye (posición 2), la bobina corta líneas de flujo magnético y la tensión se incrementa hacia el valor máximo positivo.

Cuando $\gamma = 90^\circ$ el flujo enlazado es 0 (posición 3), la bobina corta el mayor número de líneas de flujo magnético y la tensión es máxima (figura 5).

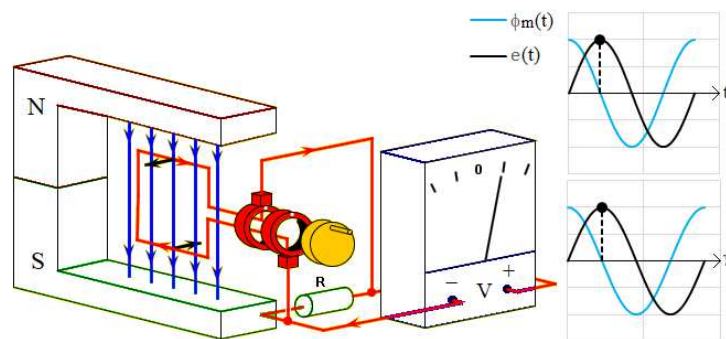


Figura 5 Si $\gamma = 90^\circ$, el flujo enlazado es 0 (posición 3), la bobina corta el mayor número de líneas de flujo magnético y la tensión es máxima.

Cuando $\gamma = 135^\circ$ el flujo enlazado aumenta (posición 4), la bobina disminuye el corte de líneas de flujo magnético y la tensión disminuye (figura 6).

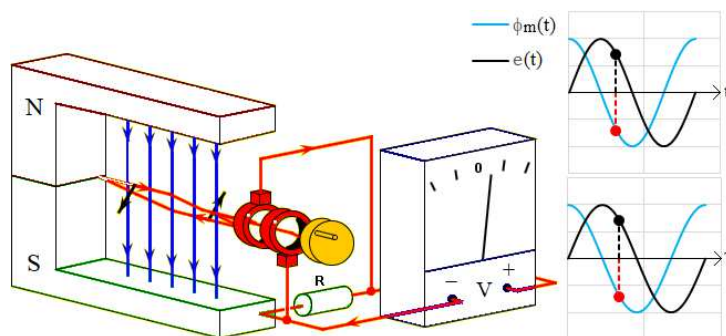


Figura 6 Si $\gamma = 135^\circ$, el flujo enlazado aumenta (posición 4), la bobina disminuye el corte de líneas de flujo magnético y la tensión disminuye.

Cuando γ tiende a 180° en sentido horario o tiende a 180° en sentido antihorario (posición 5), el flujo enlazado tiende al valor máximo, el corte de líneas de flujo magnético tiende a 0 por lo que

la tensión inducida tiende a 0V (figura 7). Observe como para este instante de tiempo la corriente cambia de dirección.

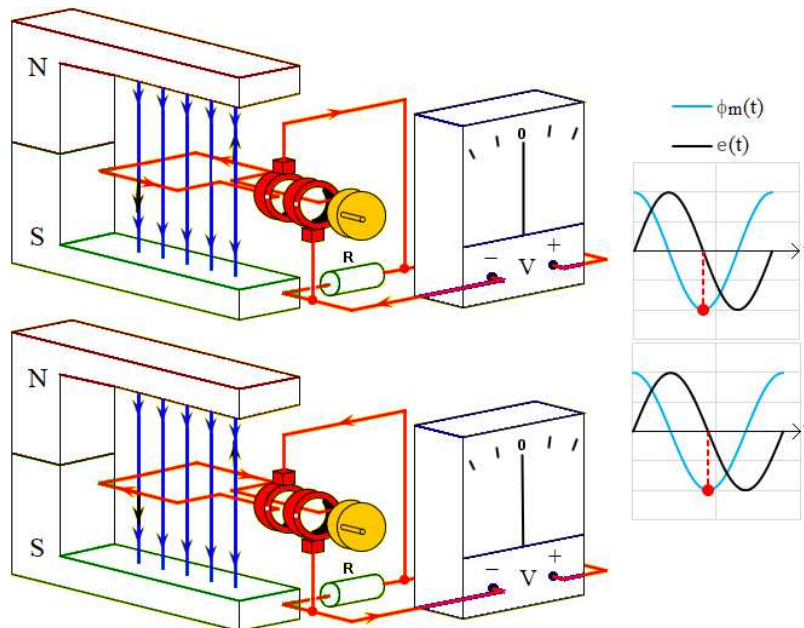


Figura 7 Si $\gamma = 180^\circ$ el flujo enlazado es máximo (posición 5), la bobina no corta de líneas de flujo magnético y la tensión es 0.

Cuando $\gamma = 225^\circ$ el flujo enlazado disminuye (posición 6), la bobina corta líneas de flujo magnético y la tensión se incrementa hacia el valor máximo negativo (figura 8).

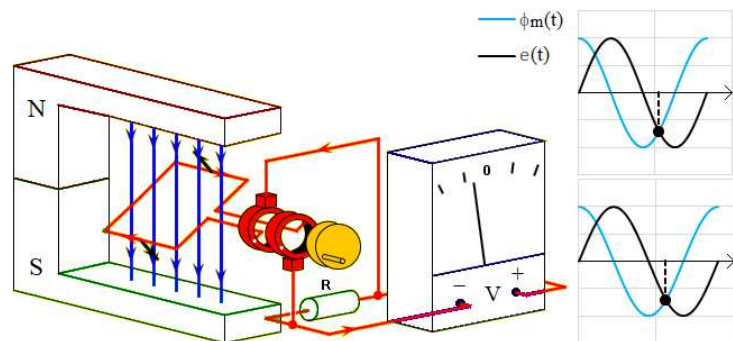


Figura 8 Si $\gamma = 225^\circ$, el flujo enlazado disminuye (posición 6), la bobina corta líneas de flujo magnético y la tensión se incrementa hacia el valor máximo negativo.

Cuando $\gamma = 270^\circ$ el flujo enlazado es 0 (posición 7), la bobina corta el mayor número de líneas de flujo magnético y la tensión es máxima (figura 9).

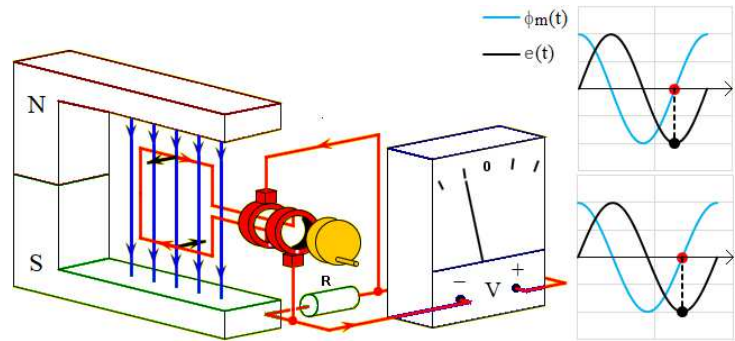


Figura 9 Si $\gamma = 270^\circ$, el flujo enlazado es 0 (posición 7), la bobina corta el mayor número de líneas de flujo magnético y la tensión es máxima.

Finalmente, cuando $\gamma = 315^\circ$ el flujo enlazado aumenta (posición 8), la bobina disminuye el corte de líneas de flujo magnético y la tensión disminuye (figura 10).

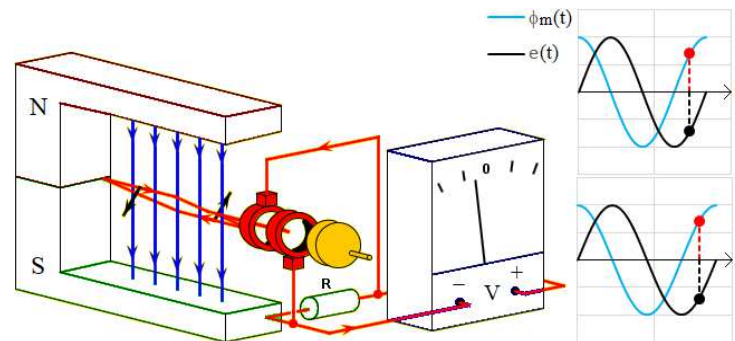


Figura 10 Si $\gamma = 315^\circ$, el flujo enlazado aumenta (posición 8), la bobina disminuye el corte de líneas de flujo magnético y la tensión disminuye.

De lo anterior, la generación de la fuerza electromotriz inducida alterna es cíclica; es decir, alternan valores positivos y negativos de fuerza electromotriz inducida con la misma amplitud y con la misma duración, pues cada vez que los conductores son cortados por el flujo de un polo magnético norte y posteriormente por el flujo de un polo magnético sur, se induce en ellos un medio ciclo positivo y un medio ciclo negativo. Con esto, la frecuencia de generación (f), en ciclos por segundo, es función del número de polos (p) y de la velocidad del rotor (n) es:

$$f = (np) / 120 \quad , \text{cps ó Hz} \quad 3$$

Se sabe que $\omega = 2\pi f$, $f = 1/T$ y $\phi_m = B L_1 L_2$, por lo que el valor máximo de la ecuación 2 es:

$$E_m = [(N \phi_m) / (L_1 L_2)] (L_1 L_2 2\pi f) = N \phi_m 2\pi f \quad 4$$

Generador de voltaje de corriente directa

Una espira que gira con velocidad constante en un campo magnético está sujeta a una FEM que invierte su polaridad cada medio giro.

Ahora, si los extremos de la espira están conectados a dos segmentos, oportunamente dispuestos y aislados entre ellos (conmutador a dos durmientes), que giran con la espira y sobre la cual se apoyan dos escobillas, es posible obtener una FEM unidireccional pulsante, dado que las conexiones de la espira se invierten cada vez que la FEM inducida pasa por el cero; es decir, cuando la espira se encuentra en el plano neutro magnético al vacío (figura 11). Por lo tanto, el valor de tensión entre los extremos del conductor no podrá alternar, sino que tendrá un extremo del conductor con un valor que oscilará entre $0V$ y $+E_m$, y el otro extremo que será la referencia 0 (masa), por tanto, la tensión siempre tendrá la misma dirección (figura 12).

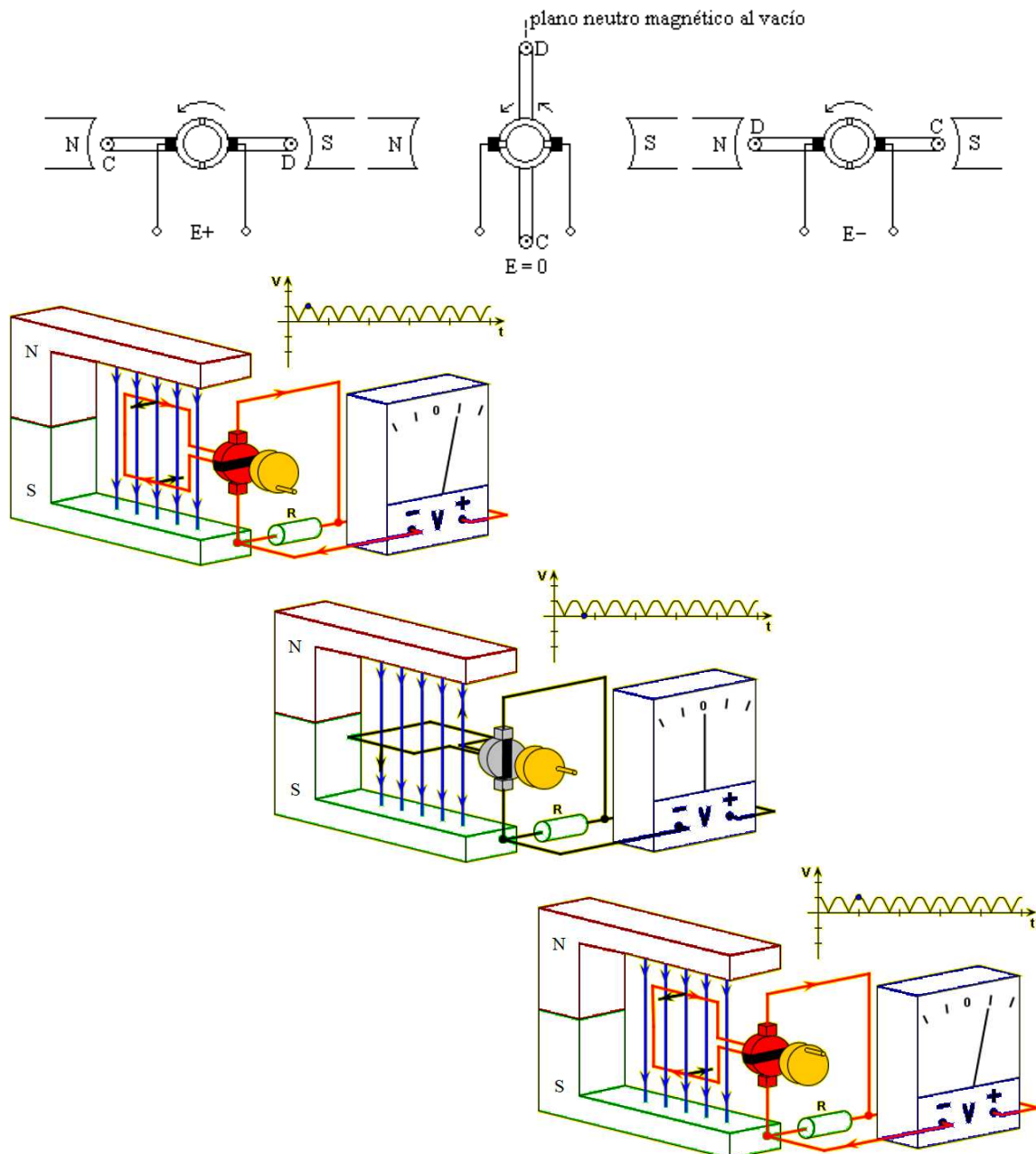


Figura 11 Generador de corriente directa con un conmutador a dos durmientes.

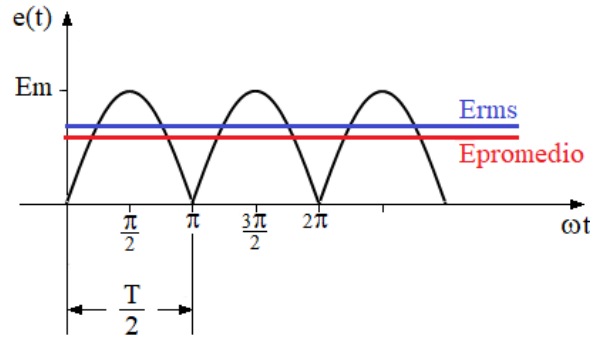


Figura 12 Tensión inducida en un generador de corriente directa con un conmutador a dos duermientes.

El valor medio y el valor rms de la función mostrada en la figura 12 se determinan usando las ecuaciones 5 y 6 respectivamente.

$$E_{\text{medio}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E_m \sin \omega t \, dt = \frac{2E_m}{\pi} = 0.636 E_m \quad 5$$

$$E_{\text{rms}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (E_m \sin \omega t)^2 \, dt = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707 E_m \quad 6$$

donde

$$E_m = N \phi_m 2\pi f \quad \text{y} \quad f = n p / 120$$

Fuerza electromotriz inducida. La fuerza electromotriz generada en el arrollamiento del inducido la define la ecuación 5. Sustituyendo E_m y f en la ecuación 5 se obtiene la ecuación 7.

$$E_{\text{medio}} = 4 \phi_m (p/2) N (n/60) \quad 7$$

donde

N número de espiras en serie entre dos escobillas de distinta polaridad (número de espiras por circuito)

Si Z = número total de conductores del inducido y a = número de circuitos en paralelo, entonces el número total de espiras es $Z/2$, y el número de espiras entre dos escobillas de distinta polaridad (número de espiras por circuito) es $N = (Z/2a)$, por lo que se obtiene la ecuación 8.

$$E_{\text{medio}} = Z (p/a) (n/60) \phi_m \quad 8$$

Para purificar la corriente directa se coloca otra espira en posición perpendicular a la primera espira. El colector tendrá que constar de cuatro delgas, para de esta forma tener unidos los cuatro extremos de las dos espiras. Tan solo se utilizan dos escobillas, que aprovecharán los valores máximos (+ E_m) de cada delga, y la contraria (masa).

La diferencia de potencial entre los bornes de salida nunca llegará a ser igual a cero, ya que siempre la escobilla con valor + recogerá, de una delga u otra, un valor superior a 0 (figura 13). Esto es:

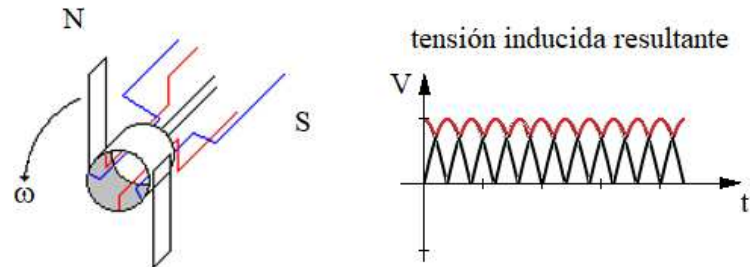


Figura 13 Dirección de la corriente en un generador de corriente directa con un conmutador a cuatro duermientes.

Motor de corriente directa

Fuerza y momento sobre una bobina giratoria. Cuando una bobina giratoria por la cual circula una corriente se coloca en un campo magnético, ésta tenderá a girar por efecto de las fuerzas ejercidas sobre los conductores que la forman.

De acuerdo con la figura 14 el valor de cada una de las fuerzas que actúan sobre los lados “a” de la bobina, se definen por la ecuación a de la introducción del **complemento: Práctica 1 Tema 1**. Por ser estas fuerzas de igual magnitud, colineales y de sentido contrario, ambas fuerzas se anulan no contribuyendo al giro de la bobina.

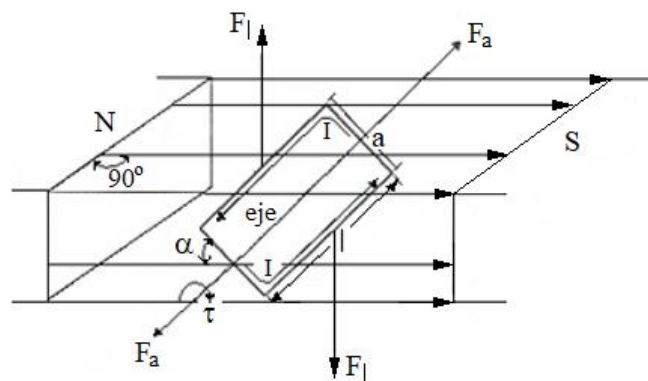


Figura 14 Fuerzas que actúan sobre los lados de la bobina.

Las otras dos fuerzas que actúan sobre los lados “l” se definen por la ecuación 8.

$$F_l = N B I l, \quad \text{sen } 90^\circ = 1 \quad 8$$

Donde ambas fuerzas son de igual magnitud y sentido contrario, pero al no ser colineales darán lugar a que la bobina gire sobre su eje.

En un motor de corriente continua, se conecta la fuente de energía a las escobillas que hacen contacto con el conmutador de la armadura. Este conmutador actúa como un interruptor que cambia la dirección del flujo eléctrico en la bobina a medida que gira. La corriente eléctrica se mueve desde la fuente hacia el motor y regresa a la fuente en una dirección única, como se ilustra en la figura 1b. Los cables de la bobina que conducen la corriente experimentan una fuerza cuando están en un campo magnético. Cuando la corriente circula a través de la bobina siguiendo la

dirección de las flechas, el imán ejerce una fuerza hacia la izquierda en el segmento de cables cerca del polo norte magnético y una fuerza hacia la derecha en el segmento de cables cerca del polo sur, lo que provoca que la armadura gire. Tras cada media vuelta, el conmutador cambia el sentido de la corriente, provocando que las fuerzas en la bobina también cambien de dirección, completando así el giro. Este proceso se repite continuamente, generando un movimiento constante que produce un par que hace funcionar el motor. El conmutador actúa como un mecanismo que asegura que la corriente en la armadura fluya siempre en la misma dirección, sin importar en qué posición se encuentre debajo de cualquier polo del estator. Si el conmutador no estuviera presente, el motor solo podría rotar una pequeña fracción y luego se detendría.

Así que, para que un motor de corriente continua opere, es esencial que una corriente fluya a través del devanado de la armadura. El estator necesita generar un campo magnético utilizando el devanado en paralelo, en serie, o una mezcla de los dos.

2.3 Tipos de generadores (excitación separada, derivación, serie y compuesto) y sus curvas características

Dado que el campo actúa como un electroimán, es necesario que una corriente de corriente continua pase a través de él para generar un campo magnético. Esta corriente se llama corriente de excitación I_e y se puede proporcionar al devanado de campo de dos maneras: puede ser de una fuente externa de corriente continua, lo que clasifica al generador como *generador de corriente continua con excitación independiente* (imagen 15), o puede provenir de la salida del propio generador, en cuyo caso se le denomina *generador de corriente continua con autoexcitación* (imagen 16).

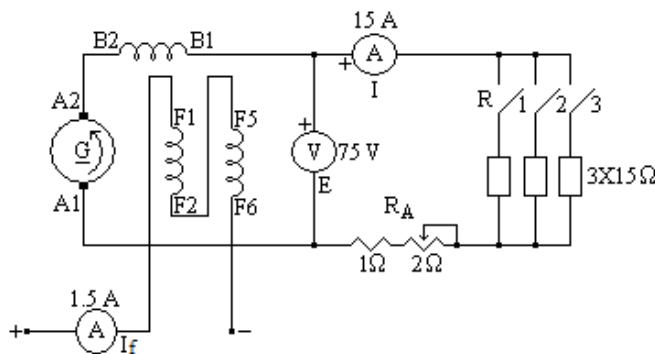


Figura 15 Generador en derivación con excitación independiente.

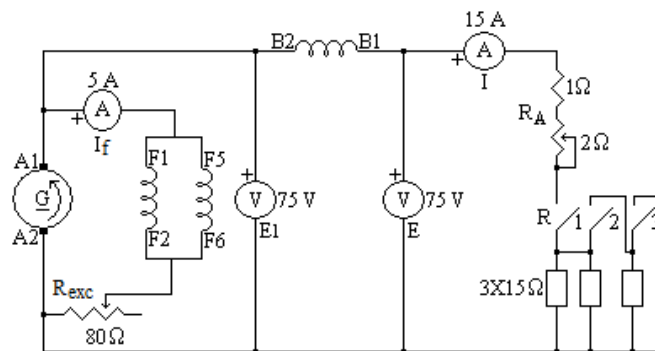


Figura 16 Generador en derivación con autoexcitación.

Aunque un sistema de excitación independiente necesita una fuente de energía de corriente directa por separado, resulta beneficioso cuando se requiere que el generador responda de forma rápida y precisa a un control externo, o cuando es necesario que el voltaje de salida cambie dentro de un amplio rango. Sin embargo, presenta la desventaja de necesitar una fuente de energía independiente de corriente continua, lo que puede ser costoso y, en ocasiones, complicado, motivo por el cual un generador autoexcitado suele ser más conveniente.

La autoexcitación ocurre gracias al campo magnético que permanece en los polos del estator. Al girar la armadura, se genera un pequeño voltaje en sus devanados. Si se conecta el devanado de campo en paralelo a la armadura, se producirá una ligera corriente de campo. Si esta corriente de campo circula en la dirección correcta, el campo magnético remanente se fortalece, lo que eleva aún más el voltaje de la armadura, resultando en un aumento rápido del voltaje. En caso de que la corriente de campo no fluya en la dirección correcta, el magnetismo remanente disminuirá y no se generará voltaje. Para solucionar esta situación, se deben intercambiar las terminales del campo en derivación.

En un generador que se autoexcita, el devanado del campo se une a la salida del generador. Puede conectarse de manera directa a la salida, ya sea en paralelo o en serie, o incluso utilizando una combinación de ambos tipos de conexión. La manera en que se realice la conexión del campo (derivación, serie, compuesta) influye en las propiedades del generador.

Los generadores que funcionan en derivación autoexcitables presentan una desventaja, ya que cuando la corriente de carga cambia del estado de vacío al de carga completa, su voltaje de salida también varía. El valor elevado de su regulación de voltaje se debe a tres elementos:

- La intensidad del campo magnético se reduce al disminuir el voltaje de armadura, lo que reduce más todavía la intensidad de dicho campo y esto, a su vez reduce el voltaje de armadura, y así, sucesivamente.
- La caída de voltaje en la armadura (I^2R) al pasar de vacío a plena carga.
- La carga puede hacer que la velocidad de funcionamiento del motor primario se reduzca, especialmente en los motores de inducción y en las máquinas de combustión interna.

Los dos devanados de campo, tanto el de derivación como el de serie, en los generadores compuestos (como se muestra en la figura 17), están conectados de modo que sus campos magnéticos se sumen entre ellos. Por ello, cuando la corriente de carga aumenta, la corriente que pasa por el devanado de campo en derivación disminuye, lo que provoca una reducción en la fuerza del campo magnético. Sin embargo, si se permite que la corriente de carga, que aumenta en la misma medida, fluya a través del devanado de campo en serie, esto incrementará la intensidad del campo magnético. Si se cuenta con el número correcto de vueltas en el devanado de serie, el aumento en la intensidad del campo magnético compensará la disminución que ocurre en el devanado de derivación. Como resultado, la intensidad del campo magnético final se mantendrá casi constante, y habrá un leve cambio en el voltaje de salida al variar la carga desde vacío hasta carga plena, formando así un *generador compuesto acumulativo*.

Si se conecta el campo serie de manera que la corriente de armadura fluya en una dirección que se opone al campo establecido por el campo en derivación, se crea un *generador compuesto diferencial*. Este generador tiene una regulación del voltaje elevada, pero resulta ser útil en

situaciones como la soldadura y la iluminación de arco, donde mantener una corriente de salida constante es más crítico que tener un voltaje de salida que no varíe.

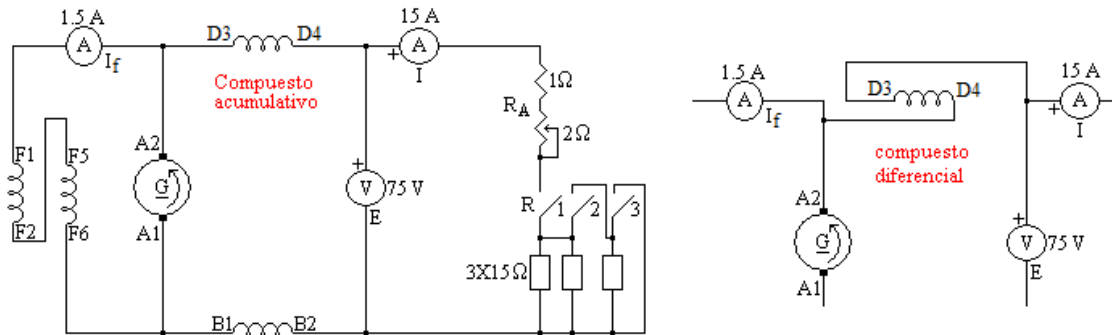


Figura 17 Generador con excitación compuesta.

El *generador serie* es aquel en el que el devanado de campo se encuentra conectado en serie con el devanado de la armadura. La corriente de excitación que fluye a través del devanado de campo de un generador en serie es igual a la corriente que el generador suministra a la carga (figura 18). Si la carga presenta una resistencia elevada, solo podrá generarse un voltaje de salida muy bajo debido a la escasa corriente de campo. En un circuito abierto, el generador producirá únicamente un voltaje de salida mínimo, gracias a su campo magnético remanente. Si la carga requiere más corriente, la corriente de excitación se incrementa, lo que hace que el campo magnético se intensifique y el generador sea capaz de generar un voltaje de salida más elevado.

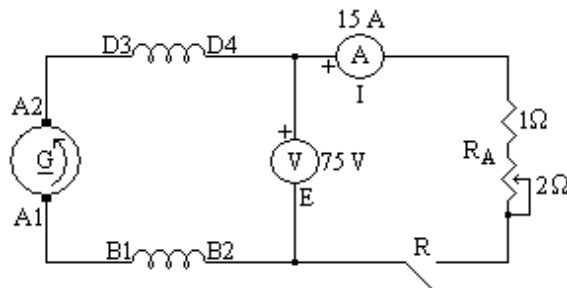


Figura 18 Generador con excitación serie.

En un generador serie, las variaciones en la corriente de carga impactan de manera significativa el voltaje de salida. Debido a su alta regulación de voltaje, no es recomendable emplearlo como fuente de energía.

Por otro lado, los generadores en serie se emplean en sistemas que distribuyen corriente continua como elevadores de voltaje de línea.

Todos los generadores antes descritos tienen la misma construcción.

Las curvas características de los generadores de corriente directa se analizan en el **complemento: Práctica 2**.

2.4 Tipos de motores (derivación, excitación separada, serie y compuesto) y sus curvas características

Sistemas de excitación. El circuito inductivo genera el campo magnético y está formado por polos principales donde se enrollan las bobinas de campo, que reciben corriente continua. La forma en que se alimenta el devanado de excitación puede ser de dos maneras: puede depender (excitación en paralelo, en serie o compuesta) o no depender (excitación separada o independiente) del voltaje de la armadura o de la corriente. El método de excitación influye en cómo opera el motor.

Operación de un motor de corriente continua. La operación de un motor de corriente continua se puede establecer mediante un método directo que implica el registro de las propiedades electromecánicas (curvas de par, velocidad, potencia de salida y eficiencia en relación con la corriente que se consume) así como las propiedades mecánicas (par en relación con la velocidad) al cargar el eje del motor usando un freno.

Dirección de giro. La dirección de giro que se asemeja al movimiento de las manecillas de un reloj (o giro horario) se refiere a la rotación de la flecha de la máquina en la misma dirección que las manecillas del reloj, desde la perspectiva de una persona que observa la máquina de frente, y hacia el extremo más largo o frente a la terminal opuesta al interruptor. La dirección de giro de un motor de corriente continua puede ser modificada al alterar el flujo de corriente en el devanado de excitación o armadura.

a) Motor con excitación separada

La corriente de excitación proporcionada por una fuente externa es independiente del voltaje de armadura o corriente (figura 19).

La rapidez de un motor de corriente continua está determinada, en gran medida, por el voltaje en su armadura y la fuerza del campo magnético. En un motor que tiene excitación separada, los devanados de campo y armadura están conectados a diferentes fuentes de alimentación de corriente continua. Si estas fuentes de corriente continua mantienen un voltaje constante, tanto el voltaje de la armadura como la intensidad del campo también permanecerán constantes. Por esta razón, se espera que un motor de excitación separada opere a una velocidad bastante uniforme.

No obstante, la rapidez suele reducirse al aumentar la carga del motor. Esta disminución en la velocidad se debe principalmente a la resistencia del devanado de armadura. Los motores que tienen excitación separada y presentan resistencias bajas en el devanado de armadura operan a una velocidad casi constante.

Similar a muchos dispositivos que convierten energía, el motor en derivación de corriente continua no opera con una eficiencia del 100%. Esto significa que no toda la energía eléctrica que recibe se transforma en energía mecánica. La variación en potencia entre la entrada y la salida se pierde en forma de calor, lo que se denomina pérdidas de la máquina. Estas pérdidas crecen a medida que aumenta la carga, lo que provoca que el motor se caliente mientras genera energía mecánica.

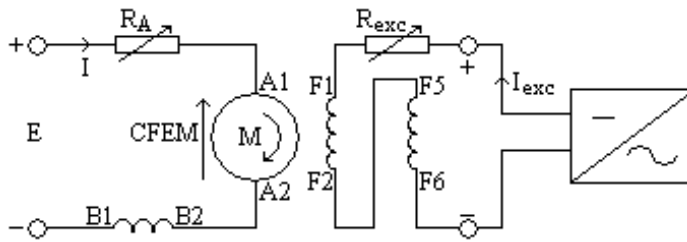


Figura 19 Motor con excitación separada.

b) Motor con excitación derivada (shunt)

La excitación del motor está relacionada con el voltaje que lo alimenta (figura 20). En un motor con excitación derivada, los devanados de campo y armadura están enlazados a la fuente de corriente directa. Si el voltaje de esta fuente se mantiene igual, tanto el voltaje en la armadura como la intensidad del campo también permanecerán constantes. Así, un motor con excitación derivada debería operar a una velocidad bastante estable. De manera similar al motor con excitación separada, en el motor de excitación derivada la velocidad tiende a bajar al aumentar la carga, esto se debe a la resistencia en el devanado de la armadura. Los motores con excitación derivada que tienen resistencias bajas en el devanado de la armadura suelen funcionar a velocidades casi invariables.

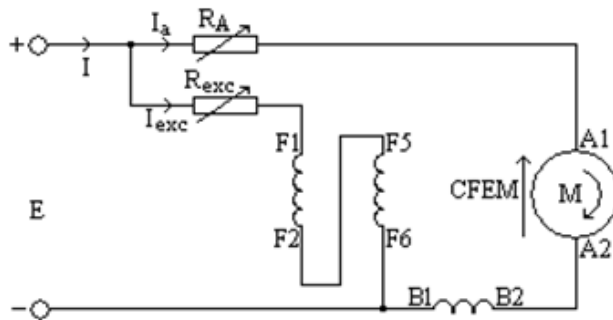


Figura 20 Motor con excitación derivada.

c) Motor con excitación serie

La energía eléctrica circula a través del circuito de la armadura así como del devanado de excitación (ver figura 21). En un motor en serie, la corriente que pasa por la armadura genera el campo magnético, lo que resulta en un campo débil cuando la carga del motor es baja. En contraste, cuando la carga es alta, se produce un campo magnético fuerte; en esta situación, el voltaje en la armadura se aproxima al voltaje de la fuente de alimentación, como ocurre en motores con excitación derivada, y la leve caída de tensión en el campo en serie puede ser ignorada. Por lo tanto, la velocidad de un motor de excitación serie depende completamente de la corriente de carga. Con cargas pesadas, la velocidad es baja, mientras que con vacío llega a ser muy alta. De hecho, muchos motores de este tipo podrían dañarse al funcionar en vacío debido a la elevada velocidad que alcanzan. Las enormes fuerzas generadas por estas altas velocidades podrían provocar la explosión del motor, lo que representa un gran peligro para las personas y las máquinas cercanas.

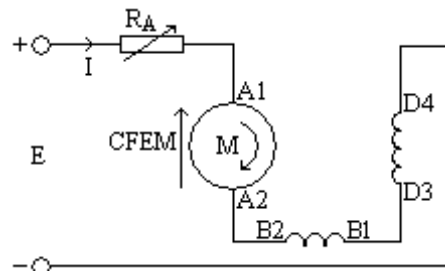


Figura 21 Motor con excitación serie.

d) Motor con excitación compuesta

El motor de excitación compuesta combina las propiedades del motor de excitación derivada y del motor de excitación serie, ya que emplea tanto el devanado de excitación derivada como el devanado de excitación serie.

La característica más destacada de un motor de excitación en serie es su elevado par motor; sin embargo, una desventaja de este tipo de motores es que pueden sobrepasar la velocidad al operar con cargas ligeras. Para resolver esto, se puede añadir un circuito de campo en derivación que potencie el campo en serie. De esta manera, el motor se transforma en una máquina compuesta acumulativa. En lo que respecta a la velocidad constante típica de los motores con excitación en derivación, esta también puede no ser ideal para algunas aplicaciones. Por ejemplo, en los casos donde el motor necesita mover un volante, es necesario permitir una reducción en la velocidad del motor para que el volante pueda perder su inercia cinética. Para estas situaciones específicas, se necesita un motor cuyo comportamiento de velocidad tenga una tendencia a disminuir; es decir, que la velocidad del motor disminuya de manera significativa al aumentar la carga. El motor de corriente directa compuesto acumulativo resulta ser el más adecuado para este tipo de tareas.

Un motor que tiene excitación compuesta se denomina motor en paralelo extendido cuando su devanado en paralelo se une a las terminales de alimentación. En cambio, se le llama motor en paralelo corto cuando el devanado de excitación se conecta al circuito de armadura, tal como se observa en los circuitos que aparecen en la figura 22.

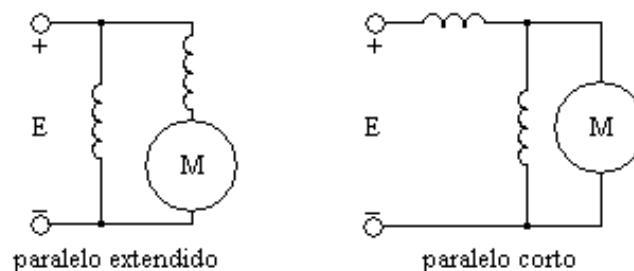


Figura 22 Motor con excitación compuesta paralelo extendido y paralelo corto.

Motor con excitación compuesta acumulativa. En el motor de excitación compuesta acumulativa (figura 23), el flujo producido por la excitación en serie se suma al flujo del generador a través de la excitación en paralelo (flujo total).

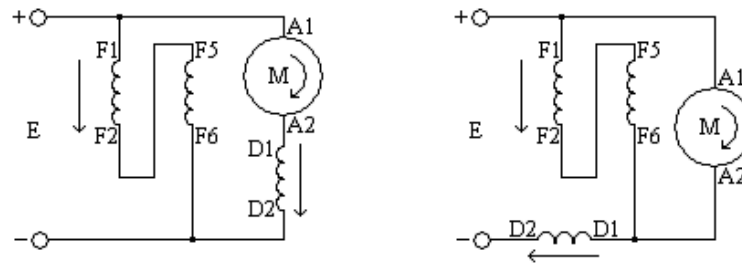


Figura 23 Motor con excitación compuesta acumulativa.

Motor con excitación compuesta diferencial. En el motor que utiliza la excitación compuesta diferencial (ver figura 24), el flujo generado por la excitación en serie se resta del flujo creado por la excitación en paralelo (flujo diferencial).

Por lo general, el flujo generado por la excitación en paralelo es más significativo que el que resulta de la excitación en serie. El primero se mantiene bastante constante, mientras que el segundo varía según la corriente que el motor consume. Así, al aumentar la carga, se incrementa la corriente absorbida, lo que lleva a un crecimiento en el flujo de excitación en serie, y eso provoca una reducción en el flujo útil. Así, la disminución de velocidad que experimentaríamos con el motor excitado en paralelo se compensa con la reducción en el flujo útil debido al campo en serie.

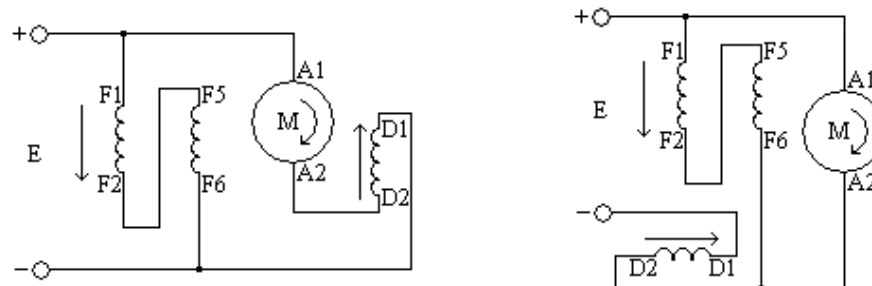


Figura 24 Motor con excitación compuesta diferencial.

Un inconveniente que tienen estos tipos de motores es que, cuando hay aumentos bruscos de carga, el campo en serie puede dominar al campo en paralelo. Esto puede hacer que el flujo útil cambie de dirección, causando que el motor se detenga y luego inicie en la dirección opuesta a la anterior. Debido a esta falta de estabilidad, el motor con excitación compuesta diferencial no se utiliza mucho.

Verificación de los devanados de excitación

Para comprobar de manera práctica si un motor de excitación compuesta se encuentra en flujo total o diferencial, se hace funcionar el motor con una carga cualquiera y se mide la velocidad de rotación n_1 .

Mientras el motor sigue en funcionamiento, se hace un cortocircuito al devanado de excitación en serie y se vuelve a medir la velocidad n_2 .

A través de comparar las dos velocidades, podemos deducir:

- a) Si n_2 es menor que n_1 , entonces contamos con un motor que opera con flujo diferencial. En realidad, tras eliminar el campo en serie, la velocidad ha disminuido porque el flujo útil ha aumentado; esto indica que el campo en serie se encontraba en oposición al campo en derivación.
- b) Si $n_2 > n_1$, entonces claramente contamos con un motor que tiene un flujo total.

2.5 Ecuación de par electromagnético para motores de corriente directa

Considere la figura 14 y la ecuación 8. De acuerdo con la figura 25 cada brazo de palanca sobre los que actúan las fuerzas F_l tienen como valor $(a/2) \cos \alpha$, por lo tanto el momento de giro sobre el eje estará determinado por la ecuación 9.

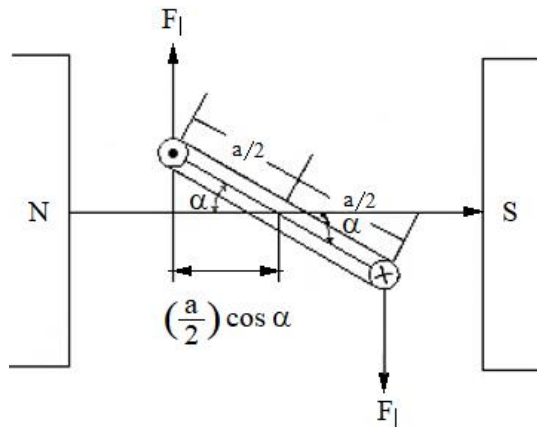


Figura 25 Momento de giro sobre el eje de la bobina.

$$\tau = 2 F_l (a/2) \cos \alpha \quad 10$$

Sustituyendo la ecuación 9 en la ecuación 10 se tiene la ecuación 11.

$$\tau = 2 N B I \left(\frac{a}{2} \right) \cos \alpha = N B I a \cos \alpha = N B I A \cos \alpha \quad 11$$

Válida para cualquier forma geométrica simétrica al eje

donde:

A área de la bobina (m^2)

α ángulo que el plano de la bobina forma con la dirección del campo magnético ($^\circ$)

La figura 26 muestra el instante en el que $\alpha = 0^\circ$, por lo que el par es máximo ($\tau = NBIA$).

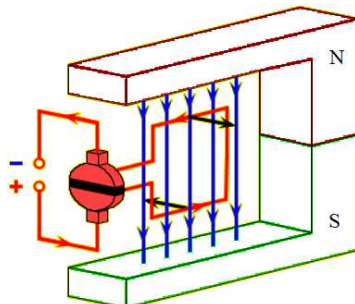


Figura 26 Fuerzas de Lorentz. Las F_l no son colineales y dan lugar a que la bobina gire sobre su eje, $\tau = NBIA$. Rotación: Horario.

A medida que la bobina gira el par reduce su magnitud, cuando el $\alpha = 90^\circ$ el $\tau = 0$ y la conmutación es óptima, como se muestra en la figura 27.

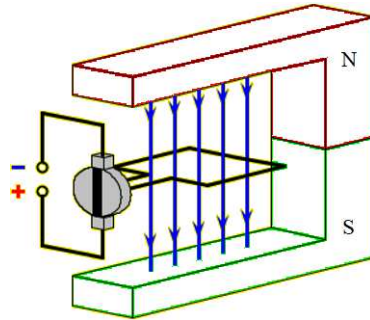


Figura 27 Si $\alpha = 90^\circ$, el $\tau = 0$. Rotación: Horario. "Conmutación óptima".

Si el ángulo α supera 90° el par incrementa su magnitud, el conmutador invierte la corriente después de media vuelta, y asegura que el par siempre esté en la misma dirección (figura 28).

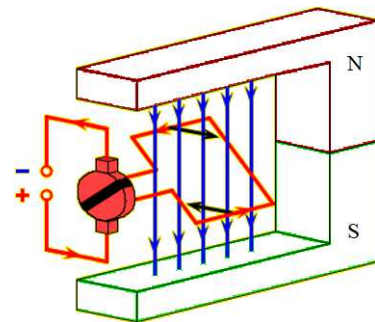


Figura 28 Si α supera 90° , el par tiene la misma dirección. Rotación: Horario.

Si la conmutación no se efectúa cuando $\alpha = 90^\circ$ la máquina acelera o frena, debido a la reacción de armadura, el plano neutro magnético se desplaza con respecto al plano neutro geométrico. En este caso las escobillas se encuentran en una posición en la cual entre las delgas del colector se establece una tensión, que tiene como consecuencia un chisporroteo. Analice la metodología "a1" del **objetivo 1** del **complemento: Práctica 2**.

Si la dirección de la corriente cambia, entonces las fuerzas cambian de dirección invirtiéndose en sentido de rotación (figura 29).

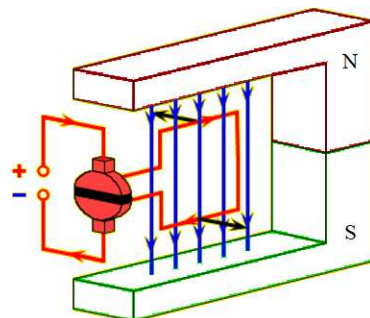


Figura 29 Cambio en la dirección de la corriente. Rotación: Anti horario.

Una forma geométrica circular de las piezas polares permiten eliminar el $\cos \alpha$. La figura 30 muestra que el campo magnético es radial ($\alpha = 0^\circ$) y que independientemente de la posición de la bobina el par siempre es máximo (ecuación 12).

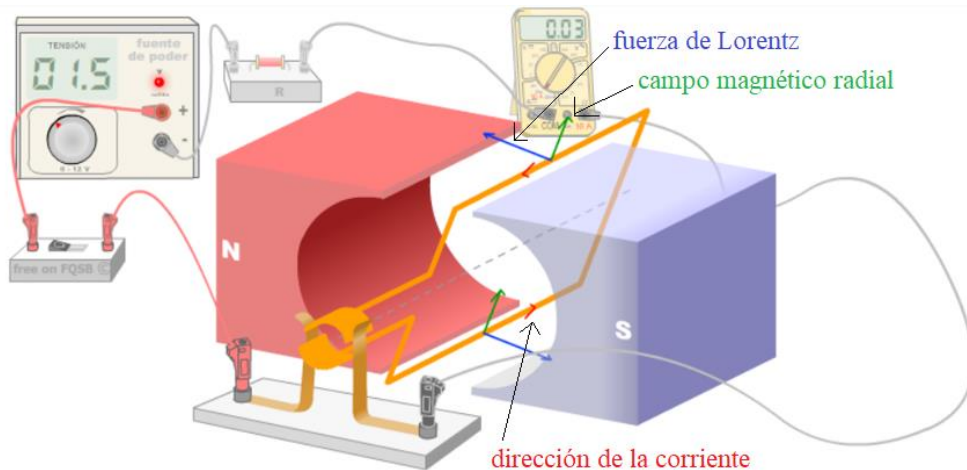


Figura 30 Modificación de las piezas polares para que el τ siempre sea máximo.

$$\tau = NBIA$$

12

El par que se genera en un motor de corriente continua está en proporción directa con la corriente en la armadura y el campo magnético del estator.

Si una corriente directa pasa por una espira con conmutador de anillo bipartido, se forma un par sobre la espira y ésta gira; el conmutador invierte la corriente después de media vuelta, y asegura que el par siempre esté en la misma dirección. Si tenemos un motor con corriente alterna, podemos omitir el conmutador, porque la corriente invierte su dirección en forma automática después de medio ciclo. La rapidez a la cual giran esos motores está relacionada con la frecuencia de la corriente alterna.

Medición del par desarrollado por el motor de corriente directa. Considere el subtema 3.9 Tema 4.

2.6 Condiciones de arranque para los diferentes tipos de motores de corriente directa

En un motor de corriente continua, se suministra energía eléctrica de una fuente externa directamente al bobinado de la armadura a través de las escobillas. Es evidente que, en este bobinado, una corriente I_a circulará, en presencia de un campo magnético ϕ , el cual interactúa con esta corriente y genera un par que provoca el giro del rotor (ecuación 13).

$$\tau = N \phi I_a$$

13

La existencia de un conmutador de segmentos (que gira con la armadura) y de escobillas (que permanecen fijas) asegura que la posición entre el flujo inducido y el que se genera a través del devanado de armadura sea constante, lo cual garantiza que el par actúe siempre en la misma

dirección. Sin embargo, en el momento en que el motor comienza a girar, se genera una fuerza electromotriz en el devanado de la armadura (acción generador) que depende tanto del flujo inductivo como de la velocidad de rotación n (ecuación 14).

$$FEM = N \phi n \quad 14$$

Según la ley de Lenz, la fuerza electromotriz (FEM) actúa en contra de la razón que la produce, lo que significa que su dirección es opuesta a la de la corriente I_a . Por esta razón, se le conoce también como fuerza contraelectromotriz (CFEM). Así, la corriente I_a puede seguir fluyendo hacia una fuente externa, cuyo voltaje debe ser:

$$E = CFEM + R_i I_a \quad 15$$

donde:

R_i resistencia interna de armadura + resistencia de las escobillas

La fuerza contraelectromotriz, conocida como CFEM, se refiere al voltaje que se genera en el devanado de la armadura cuando se cruzan las líneas del flujo magnético que son producidas por el estator. Esta CFEM actúa en contra de la fuente de fuerza electromotriz (FEM); por lo tanto, la corriente que fluye a través del devanado de la armadura depende de la diferencia entre la FEM y la CFEM, como se muestra en la ecuación 16. Si se incrementa el voltaje aplicado o la fuente de FEM, también se incrementará la corriente en la armadura, así como la velocidad del motor. La CFEM es el resultado de la corriente pasando a través de las bobinas de la armadura, que corta el campo magnético establecido entre los polos del estator, un fenómeno que se puede comparar con la acción de un generador.

$$I_a = (E - CFEM) / R_i \quad 16$$

Si la fuerza del campo magnético disminuye, se inducirá una menor fuerza contraelectromotriz, lo que permitirá que una mayor cantidad de corriente fluya a través de las bobinas de la armadura. La armadura tratará de girar más rápidamente para generar más fuerza contraelectromotriz y así limitar la corriente que pasa por ella. Por lo tanto, la velocidad se ve influenciada por dos elementos: el voltaje que se aplica y la fuerza del campo magnético del estator.

De lo anterior:

1 Cuando se eleva el voltaje aplicado a la armadura, la velocidad del motor se incrementa.

2 El motor también acelera cuando se disminuye el campo del estator. Si el campo del estator se desactiva, la velocidad puede aumentar de manera peligrosa. Los motores de corriente continua pueden explotar si funcionan a una velocidad demasiado alta.

Cuando el motor está parado, la CFEM es igual a cero. Por lo tanto, si conectamos la armadura directamente a la línea aplicando el voltaje E , la corriente solo se limita por la resistencia interna R_i , lo que puede causar que sea muy alta (ecuación 17).

$$I_a = E / R_i \quad 17$$

Es claro que se requiere disminuir la cantidad de corriente absorbida al iniciar el motor, lo cual se logra utilizando un reóstato R_A que se conecta en serie con la armadura hasta que la fuerza contraelectromotriz se estabiliza. Una vez que el motor ha sido puesto en marcha y el reóstato R_A se ha anulado, se pueden llevar a cabo las siguientes verificaciones, que se presentan asumiendo, por simplicidad, que el flujo inducido ϕ no depende de la carga.

- a) Motor sin carga. El valor de la corriente de armadura es relativamente bajo porque el par solo supera las pérdidas por fricción y las de hierro. En esta situación, el voltaje que se aplica E es casi igual a la fuerza contraelectromotriz $CFEM$.
- b) Motor con carga. Cuando se aplica el par resistente (par del freno) al motor, se observa una reducción en la velocidad y , por lo tanto, una disminución de la fuerza contraelectromotriz. Dado que el voltaje aplicado es constante, esto ocasiona un aumento en la corriente de armadura $I_a = (E - CFEM) / R_i$. Este aumento en la corriente genera un incremento proporcional en el par τ , de modo que el par resultante se iguala al del freno, logrando así la estabilización de la máquina. Si la carga se disminuye, el motor tiende a aumentar su velocidad porque el par τ supera al par del freno, lo que provoca un aumento en la $CFEM$ y una disminución de la corriente de armadura al nivel necesario para la nueva carga. Así, la fuerza contraelectromotriz funciona como un mecanismo regulador, permitiendo que el motor de corriente directa se ajuste automáticamente, absorbiendo únicamente la corriente necesaria para la carga.

2.7 Control de los motores de corriente directa

2.7.1 Arranque

2.7.2 Velocidad

2.7.3 Inversión de giro y

2.7.4 Frenado

a) Motor con excitación separada

Dado que la corriente que se absorbe I es igual a la corriente de armadura I_a , el resultado del par es:

$$\tau = N \phi I_a = N \phi I \quad 18$$

Dado que se considera que la corriente de excitación I_{exc} es fija, el flujo ϕ también se mantiene constante. Por lo tanto, el par es directamente proporcional a la corriente que se consume.

Debido a que la corriente de fuerza electromotriz contraelectromotriz ($CFEM$) es cero al inicio, la corriente que fluye en este momento es alta. Por esta razón, es necesario limitarla usando un reóstato de arranque R_A que esté completamente conectado. A medida que la velocidad aumenta, la $CFEM$ también aumenta, lo que provoca una disminución en la corriente. Esto permite que el reóstato de arranque R_A se pueda desconectar gradualmente. Cuando el motor funciona sin carga, la cantidad de corriente que se consume es baja (ya que el par también es bajo), lo cual permite que la velocidad se exprese mediante la ecuación 19.

$$n = CFEM / (N \phi) = (E - R_i I_a) / (N \phi) \cong E / (N \phi) \quad 19$$

En cambio, al aumentar el par de frenado, también se ve un aumento en la corriente que se consume. Esto provoca que las caídas de voltaje en la máquina sean mayores, lo que disminuye la velocidad, aunque sea en un grado limitado.

La característica mecánica del motor sigue una línea recta, tal como se observa en la figura 31.

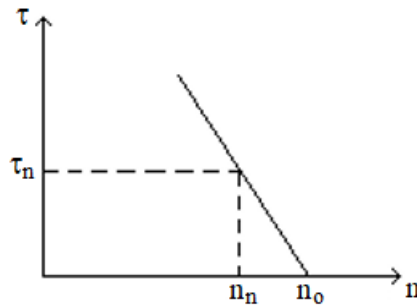


Figura 31 Característica mecánica τ vs n .

Usualmente, un reóstato de excitación R_{exc} se utiliza para modificar la velocidad de rotación.

Para cambiar la dirección de giro del motor, es suficiente con invertir la corriente de excitación, manteniendo las polaridades de la armadura sin alterar, como se ilustra en los circuitos de la figura 32.

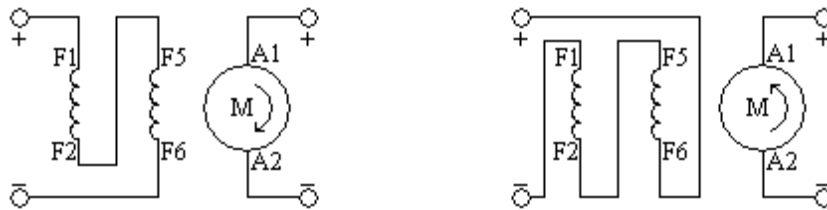


Figura 32 Inversión del giro del motor de corriente directa con excitación separada.

b) Motor con excitación derivada (shunt)

Dado que la corriente que alimenta el motor es $I = I_a + I_{exc}$, el torque se obtiene de la siguiente manera:

$$\tau = K \phi I_a \quad 20$$

Si se considera que el voltaje E que alimenta el motor permanece igual, la corriente de excitación I_{exc} también se mantendrá constante. Por lo tanto, el par motor será proporcional a la corriente que pasa por la armadura.

El funcionamiento de un motor con excitación derivada se asemeja de esta manera al de un motor con excitación separada.

Para un arranque del motor, es necesario que el reóstato de arranque R_A esté en conexión total, mientras que el reóstato de excitación R_{exc} debe estar desconectado. Por supuesto, ambos reóstatos deben permanecer conectados en todo momento a la línea.

Generalmente, la velocidad de giro se regula mediante el reóstato de excitación R_{exc} .

Para cambiar la dirección de rotación, lo más recomendable es invertir únicamente la corriente en la armadura. Esto permitirá mantener constante la dirección del campo magnético y, por ende, el magnetismo residual, tal como se ilustra en los circuitos de la figura 33.

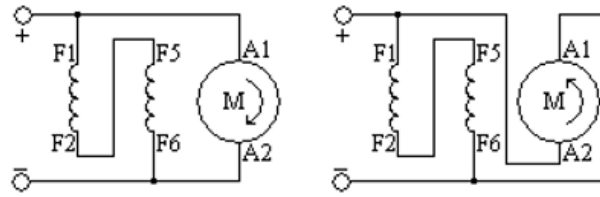


Figura 33 Inversión del giro del motor de corriente directa con excitación derivada.

c) Motor con excitación serie

Dado que la corriente en la armadura es idéntica a la de la fuente, el resultado del par es:

$$\tau = K \phi I_a = N \phi I \quad 21$$

Dado que se puede ver que el flujo ϕ es proporcional a la corriente de excitación, y por ende a la corriente de alimentación, el par se relaciona con el cuadrado de la corriente.

$$\tau = N I^2 \quad 22$$

Al inicio, la corriente que se consume tiene un valor fijo, el cual se ve limitado únicamente por la resistencia de la armadura en serie, la resistencia de las escobillas y la resistencia del devanado de excitación. Por lo tanto, en el momento del arranque, el reóstato de arranque R_A debe estar totalmente conectado.

El voltaje aplicado debe ser:

$$E = CFEM + (R_i + R_s) I \quad 23$$

donde

R_s resistencia del devanado serie

Y la velocidad de rotación es:

$$n = CFEM / (K \phi) = [E - (R_i + R_s) I] / (K \phi) \quad 24$$

Así que, cuando el motor funciona sin carga, la corriente que consume es baja y el par motor también es pequeño. Esto hace que el flujo inductivo ϕ sea reducido, y por ende, la velocidad puede aumentar a niveles muy altos, lo que podría poner en riesgo la propia integridad de la máquina.

Por estas razones, es necesario que el motor de excitación en serie se inicie con carga y nunca debe ser utilizado en lugares donde exista la posibilidad de que funcione sin carga. La característica mecánica de este motor presenta una tendencia hiperbólica en relación con las altas velocidades, tal como se ilustra en la figura 34.

La manera más fácil de modificar la velocidad de giro es cambiando la corriente únicamente en el devanado de excitación mediante un reóstato que está conectado en paralelo a este devanado.

Para cambiar la dirección de rotación, es útil cambiar la corriente de la armadura, tal como se ilustra en los circuitos de la figura 35.

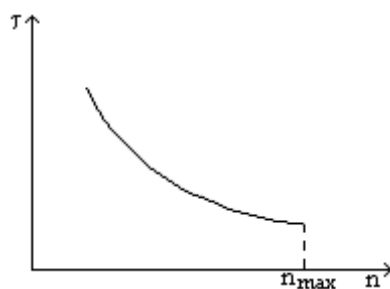


Figura 34 Característica mecánica τ vs n .

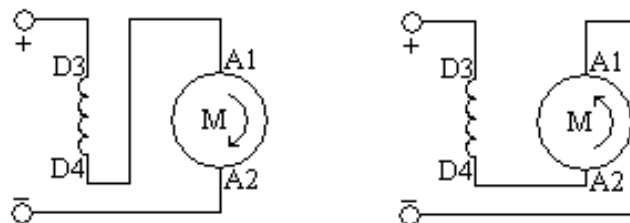


Figura 35 Inversión del giro del motor de corriente directa con excitación en serie.

d) Motor con excitación compuesta

La característica mecánica del motor muestra una inclinación que se sitúa entre las de los motores en serie y los de tipo paralelo, tal como se ilustra en la figura 36.

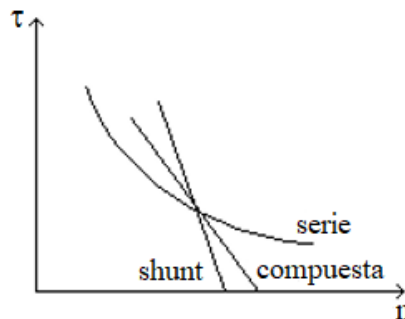


Figura 36 Comparación de las características mecánicas τ vs n del motor de corriente directa con excitación derivada, serie y compuesta.

Con cargas bajas, el campo en serie tiene un impacto reducido y el motor actúa casi como uno con excitación en paralelo; sin embargo, al aumentar la carga, el campo en serie adquiere mayor relevancia, lo que provoca que la velocidad disminuya más rápidamente en comparación con el motor excitado en paralelo.

Es posible cambiar la dirección de rotación al invertir la corriente en el circuito de armadura, mientras que se mantiene la dirección de la corriente en los dos devanados de excitación. Esto se ilustra en los circuitos de la figura 37.

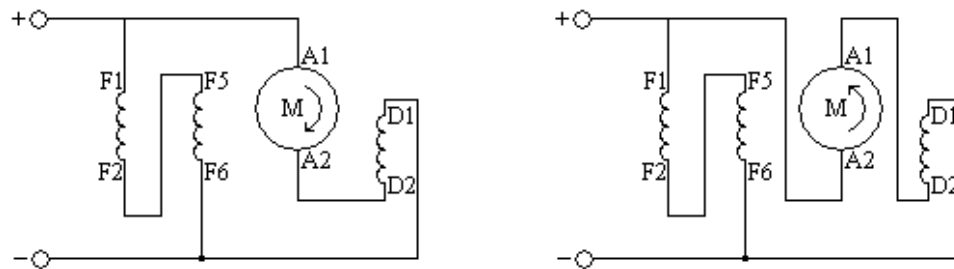


Figura 37 Inversión del giro del motor de corriente directa con excitación compuesta.

2.8 Aplicaciones de los motores de corriente directa

Los motores de corriente continua son ideales para situaciones donde se necesita controlar la velocidad y también para aquellas que requieren un alto par motor. Actualmente, hay millones de estos motores en uso que tienen una potencia menor a una fracción de caballo, utilizados en el transporte, en automóviles, trenes y aviones. Su función incluye hacer funcionar ventiladores de varios tipos para sistemas de aire acondicionado, calentadores y descongeladores; además, son responsables de mover limpiaparabrisas y operar elevadores de asientos y ventanas. También son muy efectivos para encender motores de gasolina y diésel en vehículos como autos, camiones, autobuses, tractores y lanchas.

Complementos educativos

Tema 2

Aprendizaje basado en problemas

Referencia:

Diseño del complemento:

Problema 1

“**Tema 2**” de la asignatura “**Máquinas Eléctricas**”

MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA,

Michael Liwschitz - Garik, Clyde C. Whipple

CECSA

Problema 1 Análisis del circuito magnético de la máquina de corriente directa

La estructura principal de una máquina eléctrica rotativa se compone de dos secciones: una estática (llamada estator) y otra que se mueve (conocida como rotor). Estas partes están hechas de material magnético, lo que facilita el paso del flujo magnético. Este flujo puede ser producido por un imán permanente o, de manera más eficiente, por electroimanes, como se muestra en la figura i.

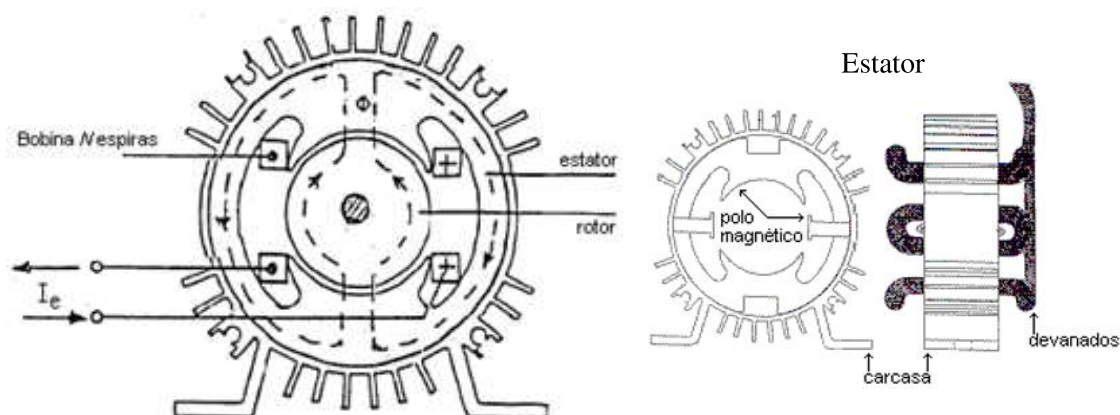


Figura i Estructura fundamental de la máquina de corriente directa.
2 polos principales y 2 polos auxiliares o de conmutación.

El total de flujo que se produce nunca es igual al flujo útil debido a las dispersiones, especialmente cerca de los extremos polares. Para considerar este aspecto, se utiliza un factor de dispersión $F_d = \phi_{\text{total}} / \phi_{\text{útil}} \quad (\cong 1.2 \text{ típicamente})$.

Cuando dos bobinas de alambre son acopladas inductivamente, el flujo pasa a través de una y entonces también pasa total o parcialmente a través de la otra. Esto significa que las bobinas tienen un circuito magnético común.

En una máquina eléctrica, el flujo magnético de cada polo sigue su trayectoria a través del yugo del estator, de la masa polar, del espacio entre la masa polar y el inducido, de los dientes del inducido, del núcleo del inducido y se completa de nuevo a través de los dientes del inducido. Este circuito magnético cerrado atraviesa dos veces el entrehierro, los dientes y la masa polar.

Es necesaria una fuerza magnetomotriz M , para crear este flujo a lo largo del circuito magnético de la máquina.

El electroimán se forma mediante bobinas con N vueltas que son atravesadas por la corriente de excitación I_e , y genera una intensidad de campo magnético:

$$H = (N I_e) / l \quad , \quad A \cdot \text{vuelta} / m \quad \textbf{i}$$

donde

l longitud recorrida por el flujo, m

La fuerza magnetizante, representada como $M = N I_e$, produce el flujo magnético ϕ_m y es el total de todas las fuerzas magnetomotrices M_m , que se relacionan con las diversas partes del circuito magnético.

$$M = \sum M_m = \sum H l = N I_e \quad \textbf{ii}$$

La suma de la ecuación **ii** debe incluir cinco términos, con variaciones en la permeabilidad μ , la longitud del camino magnético l y el área transversal A en cada uno. La densidad de flujo magnético B ($B = \phi_m / A$) varía entre la culata del estator, la masa polar, los dientes del inducido, el entrehierro y el núcleo del inducido. Por lo tanto:

$$[B_c / (\mu_o \mu_{rc})] l_c + 2[B_p / (\mu_o \mu_{rp})] l_p + 2(B_g / \mu_o) g + 2[B_d / (\mu_o \mu_{rd})] l_d + [B_n / (\mu_o \mu_{rn})] l_n = N I_e \quad \textbf{iii}$$

$$H_c l_c + 2 H_p l_p + 2 H_g g + 2 H_d l_d + H_n l_n = N I_e$$

ampere-vuelta para la culata + ampere-vuelta para los polos + ampere-vuelta para mantener el flujo polar a través del entrehierro + ampere-vuelta para los dientes + ampere-vuelta para el núcleo del inducido = M

donde

l_p , g y l_d son las longitudes de los caminos para 1 polo, 1 entrehierro y 1 diente del inducido.

La fórmula **iii** indica que, para calcular la cantidad total de ampere-vuelta M_e requerida para preservar el flujo en la estructura, se deben obtener los ampere-vuelta de cada uno de los 5 elementos y luego se deben sumar.

En el caso del aire, la permeabilidad magnética se mantiene constante [$\mu_r = 1$, $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ Wb/(A·m)], pero para los materiales ferromagnéticos, es necesario utilizar gráficos que muestren la curva de magnetización. Esto se debe a que en esos materiales la permeabilidad no es constante.

Las dimensiones de cualquier máquina de corriente directa se muestran en la figura **ii**.

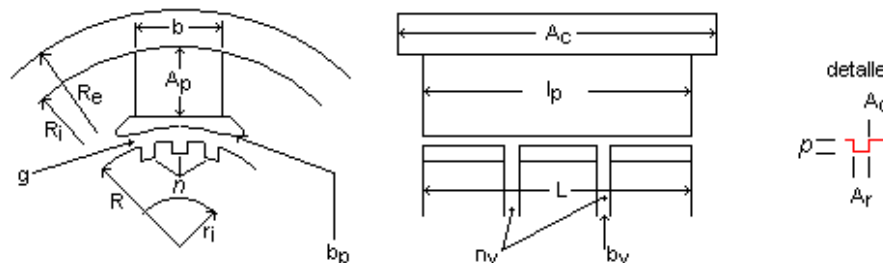


Figura **ii** Dimensiones de cualquier máquina de corriente directa.

R	radio externo del núcleo del inducido (rotor)	b	anchura polar
r_i	radio interno del núcleo del inducido (rotor)	R_i	radio interno de la culata o yugo
L	longitud total del núcleo	R_e	radio externo de la culata o yugo
n_v	número de conductos de ventilación radiales	A_c	longitud de la carcasa
b_v	anchura de cada conducto de ventilación	n	número de ranuras del inducido
g	entrehierro	p	profundidad de la ranura
b_p	polo abarcado (arco)	A_r	anchura de la ranura
A_p	altura del polo	A_d	anchura del diente
l_p	longitud polar		

Este análisis requiere: 1) conocer los parámetros del generador y 2) la curva de magnetización de la máquina a utilizar (proporcionada por el fabricante). El análisis se aplicará a la máquina de corriente directa del sistema electromecánico Microlab De Lorenzo mostrado en la figura [iii](#).

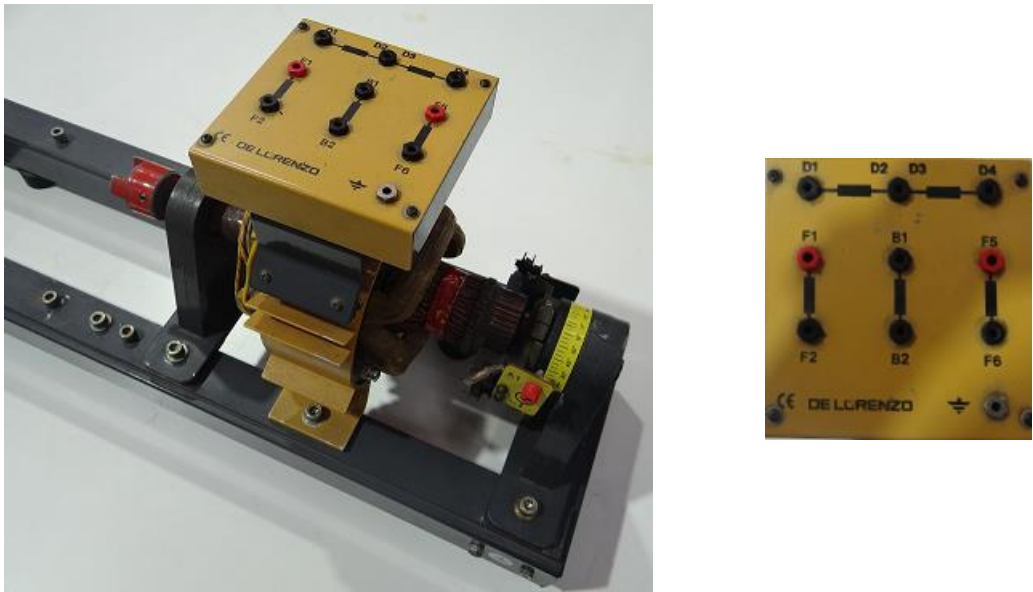


Figura [iii](#) Máquina de corriente directa del sistema electromecánico Microlab De Lorenzo.

Dimensiones de la máquina:

R	r_i	L	n_v	b_v	g
cm	cm	cm			cm
3.947	1.511	6.1	no tiene	no tiene	0.15
b_p	A_p	l_p	B	R_i	R_e
cm	cm	cm	cm	cm	cm
9.1	1.5	6	6.5	6.0	7.4
A_c	N	P	A_r	A_d	
cm		cm	cm	cm	
6.5	20	1	0.7	1	

La curva de magnetización de la máquina de corriente directa del sistema electromecánico Microlab De Lorenzo se muestra en la figura [iv](#).

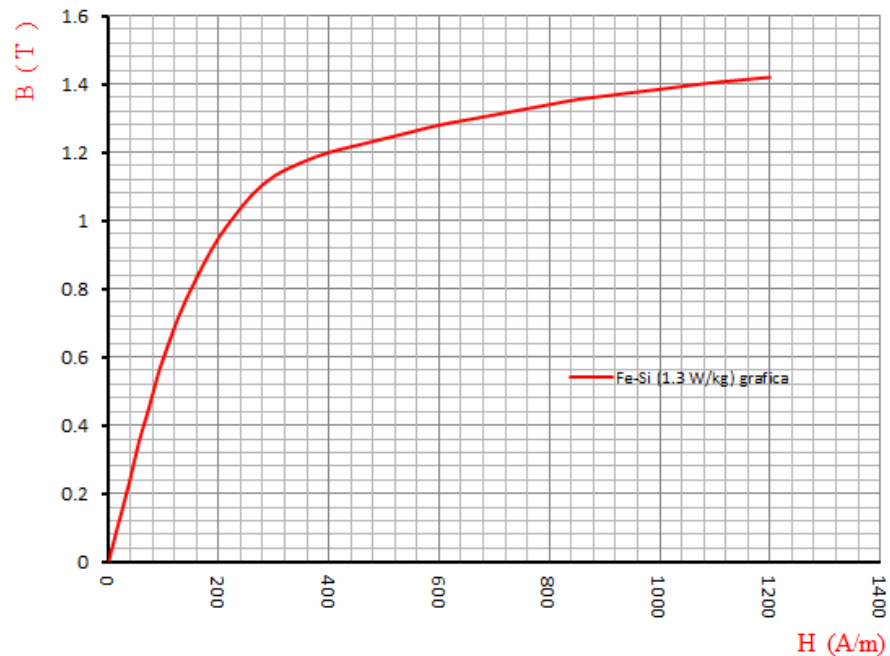


Figura iv Curvas de magnetización (define las características magnéticas del material magnético utilizado en la máquina del sistema electromecánico Microlab de Lorenzo).

Determine el valor de la corriente de excitación I_e para la máquina de corriente directa del sistema electromecánico Microlab De Lorenzo de tal manera que se obtenga un flujo $\phi_m = 1.1\text{mWb}$. Se sabe que son dos polos ($p = 2$) y cada uno tiene $N = 350$ espiras devanadas.

a) Ampere-vuelta para mantener el flujo polar a través de los dos entrehierros

Los amperios-vuelta requeridos para sostener el flujo ϕ_m en el entrehierro representan el componente más significativo de los 5.

El área se calcula así:

$$A_g = l_e b_e$$

donde:

l_e longitud efectiva del inducido
 b_e arco polar efectivo

El inducido de máquinas de tamaño medio y grande tiene su núcleo laminado dividido en varios paquetes. Entre estos paquetes, se crean conductos de ventilación radiales, que tienen como objetivo mover el calor generado en el hierro hacia el aire que circula. En estos conductos, la densidad de flujo es mucho menor que en el entrehierro que se encuentra entre el polo y el hierro del inducido. Como resultado, la longitud efectiva del inducido es menor que la longitud total del núcleo L , pero mayor que la longitud neta del núcleo que se representa como $l = L - n_v b_v$. Así se calcula l_e :

$$l_e = (L + l) / 2$$

En el caso de máquinas pequeñas:

$$l_e = L$$

Así se calcula b_e :

$$b_e = b_p + (2)(g)$$

La densidad de flujo magnético es:

$$B_g = \phi_m / A_g$$

“Para el aire entre los dientes del rotor el flujo útil es igual a ϕ_m , mientras que en los polos se tiene que considerar un flujo mayor debido a las dispersiones alrededor de las extremidades polares”

La intensidad del campo magnético es:

$$H_g = B_g / \mu_0$$

La longitud del recorrido del flujo es:

$$(2)(g)$$

Los ampere-vuelta para dos entrehierros son:

$$2 H_g g$$

Este resultado se multiplica por un factor de 1.10 para considerar que el espacio entre los puntos opuestos de la ranura es mayor, lo que lleva a un entrehierro efectivo superior a 0.15cm. Por lo tanto, M_g es:

$$M_g = (1.10)(2) H_g g \quad \text{iv}$$

b) Ampere-vuelta para los dientes

El flujo polar ϕ_m se dirige al inducido mediante los dientes que se encuentran en el arco polar b_e . El paso polar es:

$$\Gamma = (2\pi R) / p$$

Así el flujo polar ϕ_m pasa a través de $[(n/p)(b_e/\Gamma) = \quad]$ dientes. La anchura de un diente en el centro de los dientes es igual a A_d . La longitud del núcleo de hierro es ligeramente menor que la longitud neta del núcleo l , debido al aislamiento entre las placas. Se estima que la pérdida causada por el aislamiento es del 8%, la sección transversal del diente por polo es:

$$A_d = [(n/p)(b_e/\Gamma)] (A_d) (l)(0.92)$$

La densidad de flujo magnético es:

$$B_d = \phi_m / A_d$$

Para las otras porciones, incluyendo esta, se establece la fuerza del campo magnético utilizando la curva de magnetización Fe-Si (1.3 W/kg) que se puede ver en la figura iv.

Como se sabe

$$B_d = \mu_o \mu_{rd} H_d, \mu_{rd} = \text{“adimensional”}$$

Los aceros modernos tienen: $2000 \leq \mu_r \leq 10000$

La del trayecto magnético en un diente es igual a p (profundidad de la ranura) y es:

$$l_d = p$$

Los ampere-vuelta necesarios para establecer el flujo a través de los dientes son:

$$2 H_d l_d = M_d \quad v$$

c) Ampere-vuelta para el núcleo del inducido

La altura del núcleo del inducido debajo del diente es igual a:

$$h_c = [R - r_i] - p$$

La longitud del hierro del núcleo es la misma que la del diente $(l)(0.92)$.

La sección transversal del núcleo es:

$$A_n = (h_c) (l) (0.92)$$

Como el flujo polar se divide en dos partes en el núcleo, se tiene:

$$B_n = \phi_m / (2 A_n)$$

“En la parte del rotor y en los yugos del estator, solo se tendrá que tomar en cuenta la mitad del flujo efectivo.”

Para B_n la intensidad de campo magnético es H_n (se determina usando la gráfica iv).

Como se sabe

$$B_n = \mu_o \mu_{rn} H_n, \mu_{rn} = \text{“adimensional”}$$

La longitud del camino en el núcleo es igual al paso polar en el centro del núcleo, es decir:

$$l_n = \pi [(2)(r_i) + h_c] / p$$

Los ampere-vuelta necesarios para establecer el flujo a través de los dientes son:

$$H_n l_n = M_n$$

vi

d) Ampere-vuelta para los polos

El flujo total creado ϕ_m nunca es igual al flujo útil. Esto se debe a las dispersiones, especialmente en las áreas cercanas a los extremos polares. Para considerar esta situación, se utiliza el factor de dispersión $F_d = 1.2 = \phi_{mt} / \phi_m$ (flujo de dispersión $\cong 20\%$). Por lo tanto, el flujo que pasa por el polo y por la culata (yugo) es:

$$\phi_{mt} = (1.2) \phi_m$$

Las láminas del polo están cubiertas con un material aislante. Se estima que la reducción del grosor del hierro, causada por las capas de aire entre las láminas, es del 5%.

La sección transversal de un polo es:

$$A_p = (0.95) (l_p)(b)$$

La densidad de flujo en el polo es:

$$B_p = \phi_{mt} / (A_p)$$

Para B_p la intensidad de campo magnético es H_p (se determina usando la gráfica iv).

Como se sabe

$$B_p = \mu_o \mu_{rp} H_p, \mu_{rp} = \text{“adimensional”}$$

La longitud del camino en el polo se toma como equivalente a la altura del polo, sin tener en cuenta la expansión polar, ya que la densidad del flujo es menor en esta expansión.

$$l_p = A_p$$

Los ampere-vuelta necesarios para los dos polos son:

$$2 H_p l_p = M_p$$

vii

e) Ampere-vueltas para la culata (carcasa o yugo)

El espesor de la culata es:

$$e = R_e - R_i$$

La sección transversal de la culata es:

$$A_c = (0.95) (l_p)(e)$$

La densidad de flujo en el polo es:

$$B_c = \phi_{mt} / (2 A_c)$$

Para B_c la intensidad de campo magnético es H_c (se determina usando la gráfica iv).

Como se sabe

$$B_c = \mu_o \mu_{rc} H_c, \quad \mu_{rc} = \text{“adimensional”}$$

La longitud del camino magnético en la culata es:

$$l_c = [\pi (2R_c - e)]/p$$

Los ampere-vuelta necesarios para establecer el flujo en la culata es:

$$H_c l_c = M_c \quad \text{viii}$$

Cálculo de la corriente de excitación:

Los ampere-vueltas totales se definen por la ecuación iii.

$$M = N I_e = M_g + M_d + M_n + M_p + M_c$$

Dado que la magnetomotriz M total se aplica en dos polos, la razón ampere-vuelta de cada polo se obtiene fácilmente con la siguiente relación:

$$M = 2 N I_e \quad \text{ix}$$

donde:

N número de vueltas por polo
 I_e corriente de excitación

Solución:

a)

A_g	0.005734	l	0.061
l_g	0.0015	l_e	0.061
		b_e	0.094

B_g	H_g	M_g	$\mathcal{R}_g$	μ_{rg}
densidad g	campo g	fuerza g	reluctancia g	permeabilidad g
0.191838158	152659.9559	503.7778546	457979.8678	1

b)

A_d	0.004254304	Γ	0.123998662
l_d	0.01	$(n / p)(b_e / \Gamma)$	7.580726958

B_d	H_d	M_d	$\mu_r d$	$\Re_d$
densidad d	campo d	fuerza d	per d	reluctancia d
0.258561684	39.14973452	0.78299469	5255.638472	711.8133549

c)

A_n	0.000805883	hc	0.01436
l_n	0.0700261		

$\phi_{mn} = \phi_m/2$	B_n	H_n	M_n	$\mu_r n$	$\Re_n$
flujo n	densidad n	campo n	fuerza n	per n	reluctancia n
0.00055	0.682481034	124.1527337	8.693931775	4374.45987	15807.14868

d)

A_p	0.003705
l_p	0.015

$\phi_{mp} = \phi_{mt}$	B_p	H_p	M_p	$\mu_r p$	$\Re_p$
flujo p	densidad p	campo p	fuerza p	per p	reluctancia p
0.00132	0.356275304	52.4570258	1.573710774	5404.707456	1192.205132

e)

A_c	0.000798	e	0.014
l_c	0.210486708		

$\phi_{mc} = \phi_{mt}/2$	B_c	H_c	M_c	$\mu_r c$	$\Re_c$
flujo c	densidad c	campo c	fuerza c	per c	reluctancia c
0.00066	0.827067669	157.1748797	33.08322298	4187.434661	50126.09543

Corriente de excitación:

La corriente de excitación I_e que se requiere para sostener un flujo $\phi_m = 1.1$ mWb a lo largo del camino magnético es:

I_e
corriente exc
0.782731021

Aprendizaje basado en retos

Referencia:

Diseño del complemento:

Reto 1, 2 y 3

“Tema 2” de la asignatura **“Máquinas Eléctricas”**

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Cualquier herramienta computacional se diseña en términos de un modelo matemático. La frase “analizar la herramienta computacional” se refiere que el profesor debe proponer el modelo matemático en análisis (el modelo se propone en alguna tarea del complemento educacional “aprendizaje basado en problemas”) y posteriormente mediante el uso de la herramienta computacional explica que hace, de tal manera que el estudiante tiene una idea certera sobre para que sirve. La frase “construcción de la herramienta computacional” se refiere que el profesor debe proponer el modelo matemático en análisis y posteriormente el estudiante construye la herramienta computacional, obviamente el profesor revisa y corrige (si hubiera errores) el trabajo del estudiante hasta que concreta lo que el profesor ha definido como final.

Reto 1 Análisis de la herramienta computacional “saturación”

Para validar el modelo matemático expuesto en el **complemento: Problema 1** se excita el devanado de campo derivado “serie a favor” (2 bobinas, una por polo y no conectadas, con 350 vueltas, calibre 25), terminales F1-F2, F5-F6 del generador de corriente directa del sistema electromecánico Microlab De Lorenzo (figura [iii](#)) y se hace girar el generador de corriente directa usando el motor de inducción del sistema electromecánico Microlab De Lorenzo mostrado en la figura [v](#) para velocidades $n = 1800\text{rpm}$ y $n = 3600\text{rpm}$.

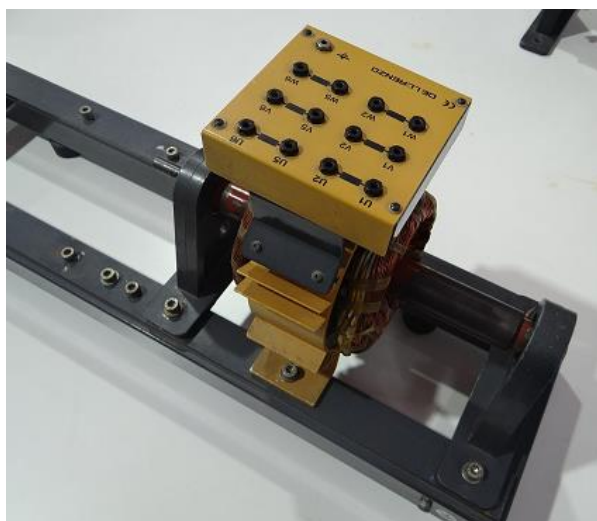


Figura [v](#) Motor de inducción del sistema electromecánico Microlab de Lorenzo.

Observación:

1 Los conductores del inducido no llevaban corriente, o sea que el inducido no estaba cargado (característica de vacío o curva de magnetización).

Del experimento práctico se obtienen las lecturas indicadas en la tabla i.

Las características de vacío o curvas de saturación magnética E_{medio} vs I_e para los valores indicados en la tabla i se muestran en la figura vi.

Tabla i Características de vacío o curvas de saturación magnética
(valores propuestos y medidos).

		n_1		n_2
		rpm		rpm
		1800		3600
I_e	No. de medición	E_{medio}	No. de medición	E_{medio}
A		V		V
0	1	0.272	27	0.54
0.1	2	2.5	28	4.4
0.2	3	4.2	29	7.6
0.3	4	5.7	30	11.5
0.4	5	7.8	31	15.8
0.5	6	9.6	32	19.6
0.6	7	11.6	33	23.1
0.7	8	13.2	34	26.2
0.8	9	14.7	35	29.4
0.9	10	15.9	36	31.8
1	11	17.3	37	34.4
1.1	12	18.4	38	36.3
1.2	13	19.4	39	38.5
1.3	14	20.3	40	40.2
1.4	15	21.1	41	41.9
1.5	16	21.9	42	43.2
1.6	17	22.5	43	44.4
1.7	18	23.1	44	45.5
1.8	19	23.6	45	46.5
1.9	20	24	46	47.3
2	21	24.4	47	48.1
2.1	22	24.8	48	48.8
2.2	23	25.1	49	49.6
2.3	24	25.5	50	50
2.4	25	25.8	51	50.7
2.5	26	26.1	52	51.2

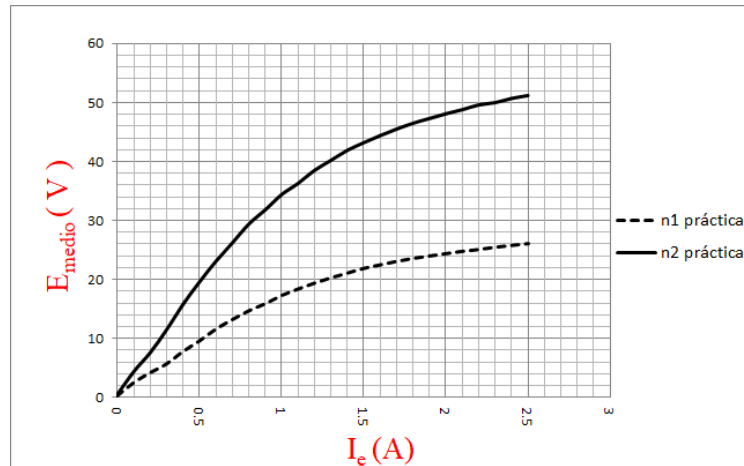


Figura vi Características de vacío o curvas de magnetización para $n = 1800 \text{ rpm}$ y $n = 3600 \text{ rpm}$ empleando valores prácticos.

Ahora debe emplearse la ecuación 7 usando cada valor de tensión de la tabla i para obtener cada flujo magnético y calcular cada corriente de excitación I_e para las dos velocidades. El modelo matemático expuesto en el **complemento: Problema 1** se usa 52 veces obteniendo los valores de corriente I_e mostrados en la tabla ii.

Z, a y N se obtienen de los datos del devanado del inducido propuestos por el fabricante.

Datos del devanado del inducido:

Paso de los canales: 10

Paso al colector: 1

Vueltas: 5+5

Diámetro del conductor: 1.15 mm

Avance: dirección progresiva

Sentido: horario

Doble nivel, dos secciones por nivel

Por lo tanto $Z = 400$ conductores, $a = 2$ circuitos en paralelo y $N = 100$ espiras por circuito.

Finalmente se comparan los valores prácticos con los teóricos. Los comportamientos se muestran en la figura vii.

Tabla ii Cálculo de la corriente de excitación I_e para $n = 1800 \text{ rpm}$ y $n = 3600 \text{ rpm}$.

n		n	
1800	rpm	3600	rpm
I_e	Medición	I_e	Medición
corriente exc		corriente exc	
0.016446399	1	0.016322131	27
0.148449522	2	0.131157044	28
0.245926761	3	0.222969829	29
0.332810561	4	0.335734025	30
0.457159952	5	0.463151105	31

Continuación de la tabla ii.

n		n	
1800	rpm	3600	rpm
I_e	Medición	I_e	Medición
0.565546783	6	0.577630048	32
0.686297041	7	0.683283123	33
0.782731021	8	0.776693085	34
0.874171554	9	0.874171554	35
0.950032348	10	0.950032348	36
1.045472107	11	1.038289707	37
1.129742855	12	1.109632974	38
1.217450472	13	1.203455289	39
1.309046869	14	1.287460682	40
1.403703997	15	1.384859016	41
1.514094837	16	1.470633993	42
1.609389135	17	1.560276121	43
1.717309871	18	1.652716065	44
1.818262889	19	1.746482956	45
1.907099207	20	1.82895891	46
2.003825411	21	1.918744524	47
2.109142219	22	2.003825411	48
2.194212243	23	2.109142219	49
2.316373999	24	2.165252356	50
2.414993849	25	2.269350214	51
2.520012947	26	2.348558876	52

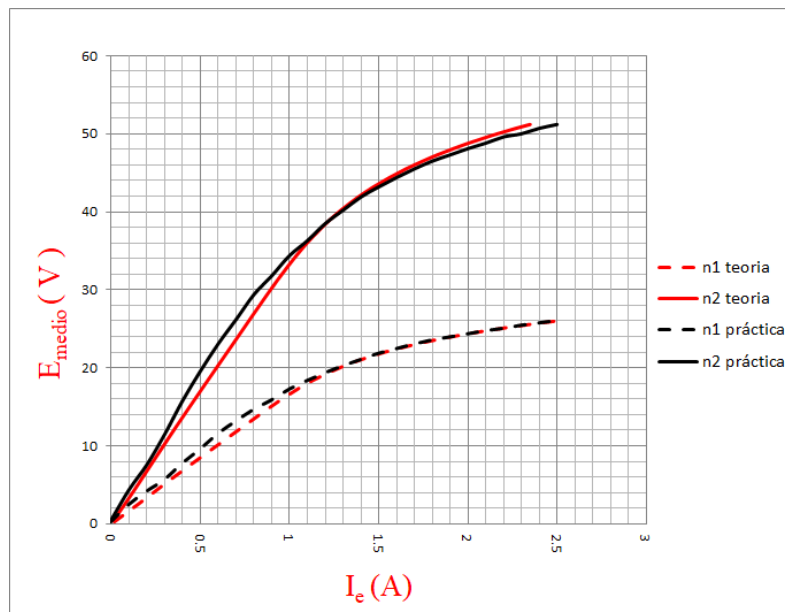


Figura vii Características de vacío o curvas de saturación magnética para $n = 1800$ rpm y $n = 3600$ rpm empleando valores prácticos y teóricos.

En materiales ferromagnéticos, la permeabilidad no permanece constante, ya que es alta con inducciones bajas pero disminuye al llegar a la saturación. El efecto de saturación en el circuito magnético se observa por la reducción de la variación en la tensión inducida. La parte inferior de la curva de saturación magnética o característica en vacío se asemeja a una línea recta. Esto sucede porque, con valores pequeños de flujo magnético, la cantidad de ampere-vuelta requerida en las cuatro partes del hierro del circuito es insignificante en comparación con lo que se necesita en el entrehierro. A medida que el flujo magnético aumenta, también lo hacen los ampere-vuelta en el hierro, y la característica en vacío se inclina hacia la derecha de la línea del entrehierro.

Puesto que se dispone de todos los cálculos es posible graficar cualquier cantidad contra cualquier cantidad para analizar lo que se desee.

Observación:

2 Para una máquina de p polos. Se realiza un estudio para 2 polos y el resultado final de la fuerza magnetomotriz de cada sección se multiplica por la cantidad de circuitos magnéticos (ncm) del motor específico: 2 polos – 1 circuito, 4 polos – 2 circuitos, 6 polos – 3 circuitos, y así sucesivamente.

Reto 2 Construcción de la herramienta computacional “análisis del generador de corriente directa y cálculo de su eficiencia”

La eficiencia de cualquier generador con excitación independiente se calcula empleando el modelo matemático de la tabla [iii](#).

Tabla [iii](#) Modelo matemático para calcular la eficiencia del generador con **excitación independiente**.

Rw=	0.3 Ω	Resistencia del devanado de los polos de conmutación
Ra =	0.32 Ω	Resistencia del devanado de armadura
Re =	42 Ω	Resistencia del devanado de excitación derivada (conexión serie)
P =	175 W	dato de placa

I	0	2	3.5	4	4.5	5	5.5
E	35	35	35	35	35	35	35
P=E*I	0					175	
Ie							
Pe=Re*Ie^2							
Po=0.232*P	40.6	40.6	40.6	40.6	40.6	40.6	40.6
Pw=Rw*I^2							
Pa=Ra*I^2							
Pb=0.06*I^2							
Pad=0.01*P							
Pd							
Pin=P+Pd							
eficiencia							

$$P_d = P_e + P_o + P_w + P_a + P_b + P_{ad}$$

Características en operación promedio de la máquina (dato de placa):

Pe pérdidas en el devanado derivado F1-F2, F5-F6
Po pérdidas constantes
Pw pérdidas en el devanado de conmutación B1-B2
Pa pérdidas en el devanado de armadura A1-A2
Pb pérdidas en las escobillas
Pad pérdidas adicionales

P = 175 W
E = 35 V
I = 5 A
Ie = 1 A
n = 3000 rpm

Continuación de la tabla [iii](#).

Notas:

1. P_o se calcula usando la potencia P obtenida de la placa de la máquina. Independientemente de la carga que el generador tenga conectada en sus terminales, estas pérdidas son constantes.
2. P_{in} equivale a la potencia mecánica suministrada por el motor síncrono.
3. Este procedimiento se aplica a cualquier generador.
4. El factor 0.232 se determina en base al sistema usado.
En este sistema el entrehierro del generador es grande.

En la tabla [iii](#) las resistencias y las características en operación promedio de la máquina (dato de placa) son valores supuestos, estos valores supuestos se especificaron solo para utilizar la tabla [iii](#).

Esta herramienta computacional permite explicar el funcionamiento del generador con excitación independiente. La máquina usada para construir esta herramienta es el generador del sistema electromecánico Lab-Volt mostrada en la figura [viii](#). Esta herramienta computacional no considera el efecto de la temperatura.



Figura [viii](#) Máquina de corriente directa del sistema electromecánico Lab-Volt EMS8211.

El dato de placa del generador de corriente directa se muestra en la tabla [iv](#).

Tabla iv Dato de placa de la máquina de corriente directa del sistema electromecánico Lab-Volt, como generador.

$P_{nominal}$	E	I	n
W	V	A	rpm
120	120	1	1800

La tabla v muestra las resistencias de los devanados. Estas resistencias se determinaron mediante el método del Volt-Ampere.

Tabla v Valores de las resistencias de los devanados a temperatura $T_1 = 20^\circ\text{C}$.

Resistencia del devanado de los polos de conmutación	Resistencia del devanado de armadura	Resistencia del devanado de excitación derivada
R_w	R_a	R_e
Ω	Ω	Ω
0	9.082	236.57

Para la característica de carga los valores propuestos, medidos y calculados se muestran en la tabla vi.

Tabla vi Característica de carga. Valores propuestos, medidos y calculados.

I_a	R_L	E_a	I_A	P	% reg de V
A	Ω	V	A	W	%
	1.00E+99				
	600				
	300				
	200				
	150				
	120				
	100				
	85				
	75				

	valor medido
	valor calculado
	el dato se pasa
	valor propuesto

Las pérdidas y el cálculo de la eficiencia se registran y calculan en la tabla vii.

Tabla **vii** Pérdidas y cálculo de la eficiencia. Característica de carga. Generador de corriente directa con **excitación independiente**.

I_A	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.48	1.56
E_a	120	120	120	120	120	120	120	120	120
$P = E_a I_A$									
I_f	0.28	0.3	0.31	0.32	0.34	0.36	0.37	0.39	0.41
$P_e = R_e I_f^2$									
$P_o = \text{factor}_1 P_{\text{nominal}}$									
$P_w = R_w I_A^2$									
$P_a = R_a I_A^2$									
$P_b = \text{factor}_2 I_A^2$									
$P_{ad} = \text{factor}_3 * P$									
P_d									
$P_{in} = P + P_d$									
eficiencia									

Finalmente se grafican las características E_a vs I_A , I_f vs I_A , P_d vs P y η vs I_A .

Observación:

3 La herramienta computacional permite proceder con la característica de carga o con la característica de regulación.

4 Se pueden usar modelos matemáticos similares a la tabla **iii** para analizar cualquier generador de corriente directa.

Reto 3 Construcción de la herramienta computacional “determinación del dato nominal del motor de corriente directa, características electromecánicas y cálculo de su eficiencia”

Esta herramienta computacional permite explicar el funcionamiento del motor de corriente directa determinando el dato de placa y la eficiencia de la máquina. La máquina usada es la máquina de corriente directa del sistema electromecánico Lab-Volt mostrada en la figura [viii](#). Esta herramienta computacional considera el efecto de la temperatura, el efecto de la temperatura se considera al utilizar la tabla [iii](#) con el propósito de calcular pérdidas y la eficiencia.

El dato de placa del motor se muestra en la tabla [viii](#).

Tabla [viii](#) Dato de placa de la máquina del sistema electromecánico Lab-Volt, como motor.

E	I	Pm	n
V	A	W	rpm
120	2.8	175	1800

Los valores que deben medirse, los valores propuestos y calculados se muestran en la tabla [ix](#).

Tabla [ix](#) Motor de corriente directa con excitación derivada. Valores medidos y calculados.

Valores medidos						Valores calculados						
E	It	Ie	n	τ	I_{freno}	Ia	Hp	Pmecánica	Pelectrica	η	pérdidas	% reg vel
V	A	A	rpm	lb _f ·in	A	A		W	W	%	W	
120				0.15								
120				1.5								
120				3								
120				4.5								
120				6								
120				7.5								
120				9								
120				10.5								
120				12								

El dato de placa propuesto se muestra en la tabla x.

Tabla x Dato de placa propuesto. Motor de corriente directa con excitación derivada.

dato de placa propuesto:			
E	I_t	Pmecánica	n
V	A	W	rpm

	dato
	valor medido
	valor calculado

Se grafican la característica mecánica: par como función de la velocidad y las características electromecánicas: curvas de par, de velocidad, de la potencia de salida y de la eficiencia como función de la corriente absorbida.

Finalmente, se calculan las pérdidas y la eficiencia del motor de corriente directa con excitación derivada se usando el modelo matemático de la tabla iii. Los resultados se muestran en la tabla xi.

Tabla xi Pérdidas y cálculo de la eficiencia. Motor de corriente directa con excitación derivada.

Rl _{T1}	R _w	Resistencia del devanado de los polos de conmutación	0	Ω
	R _a	Resistencia del devanado de armadura	7.55	Ω
	R _A	Resistencia de arranque	0	Ω
	R _{exc}	Resistencia del devanado de excitación derivada (conexión serie)	270	Ω
	P	dato de placa		W

Temperatura ambiente, T1	Temperatura de referencia, T
°C	°C
25	234.5

Continuación de la tabla xi.

Temperatura de operación de los devanados, T2		25	26	27	28	29	30	31	32	33
R_{T2}	Rw									
	Ra									
	R_A									
	Rexc									
E		120	120	120	120	120	120	120	120	120
It		0.65	0.9	1.19	1.45	1.75	2	2.3	2.7	2.89
Ie		0.27	0.269	0.268	0.267	0.266	0.265	0.264	0.263	0.262
$R_{exc} + R_{reostato} = R_{eq1}$										
Rreostato										
Ia										
$P = E * I_t$										
$P_{R_{exc}} = R_{exc} * I_e^2$										
$P_{reostato} = R_{reostato} * I_e^2$										
$P_{Req1} = P_{R_{exc}} + P_{reostato}$										
$P_{Req1} = R_{eq1} * I_e^2$										
$P_o = factor1 * P$										
$P_w = R_w * I_a^2$										
$P_a = R_a * I_a^2$										
$P_b = factor2 * I_a^2$										
$P_{ad} = factor3 * P$										
$P_{R_A} = R_A * I_a^2$										
Pd										
$P_{mecánica} = P - P_d$										
η										
τ										

Observación:

5 La herramienta computacional permite analizar el motor con excitación derivada, serie y compuesto paralelo corto acumulativo.

6 Se pueden usar modelos matemáticos similares a la tabla iii para analizar cualquier motor de corriente directa.

Rúbrica para evaluar las prácticas de laboratorio

Portada

La portada debe contener:

1. Nombre de la institución
2. Carrera
3. Número y nombre la práctica
4. Nombre de los estudiantes
5. Nombre del profesor
6. Fecha de entrega

En el encabezado aparece mi nombre, esto es así porque un servidor diseño la propuesta. Cuando ustedes envíen su documento deberán quitar mi nombre e incluir el encabezado (si desean incluirlo), pie de página (si desean incluirlo), logotipos (si desean incluirlos).

Objetivos

Incluir los objetivos indicados en la práctica.

Material y equipo

Incluir la lista indicada en la práctica mencionando las especificaciones técnicas del equipo.

Discusión de resultados:

Al reportar resultados calculados de las prácticas de laboratorio deben utilizar 3 cifras de precisión.

1 Deben respetar la propuesta metodológica de la práctica para mostrar resultados sin tener que repetir la redacción de los procedimientos y sin mostrar los circuitos eléctricos.

40%

2 Deben hacer observaciones (2 o más por objetivo) de los experimentos propuestos en los procedimientos (*esta redacción es en equipo*). Estas observaciones se indican en cada objetivo.

10%

Conclusiones

Deben incluir conclusiones por objetivos y son individuales.

Cada conclusión debe ser redactada en un párrafo de 5 renglones completos (el espaciado, tamaño y tipo de letra a considerar es: espacio sencillo, 10 arial o times new roman).

La conclusión es una redacción técnica haciendo referencia a la introducción, ecuaciones, cálculos y comportamientos gráficos.

20%

Demostración práctica

Deben redactar en cada objetivo (sin incluir diagramas eléctricos, cálculos, etc) que fue lo que se hizo y que interpretas de la demostración práctica del objetivo (*esta redacción es en equipo*). Cada demostración práctica debe ser redactada en un párrafo de 8 renglones completos (el espaciado, tamaño y tipo de letra a considerar es: espacio sencillo, 10 arial o times new roman). Esta sección depende de lo que haga un servidor en las demostraciones prácticas ejecutadas en el laboratorio.

30%

Aprendizaje basado en prácticas de laboratorio

Práctica 1

Principio del funcionamiento del motor de corriente directa

Objetivos:

- 1 Utilizar la fuerza de Lorentz para analizar la fuerza ejercida sobre una bobina giratoria que se encuentra en la influencia de un campo magnético (aplicación de la regla de la mano derecha).
- 2 Analizar el par generado por la bobina.
- 3 Analizar la máquina de corriente directa elemental para comprender la función del conmutador.

Material y equipo necesario:

Equipo Lab-Volt:

- 1 Módulo de suministro de potencia EMS8821

Otros:

- 1 Interruptor 1 tiro 1 polo
- 1 Multímetro
- 1 Amperímetro de corriente directa
- 1 Bobina de 5 espiras con cintas sustentadoras y aguja indicadora
- 1 Reóstato 140Ω, 1.45A
- 1 Imán permanente de herradura
- Soportes y escala del equipo de Física Torres de Quevedo
- Prototipo “Máquina de Corriente Directa”
- Cables

Metodología:

Objetivo 1

a) La figura **a** muestra la bobina móvil sujeta a cintas sustentadoras usada en la figura **b**. la figura **b** muestra el sistema motor electromagnético de bobina móvil, este sistema es el que usan los instrumentos de medición para medir tensiones y corrientes en corriente directa.

Conecte el circuito mostrado en la figura **b**.

Predicción 1 (considerando el observador 1). Defina la dirección de rotación de la bobina móvil utilizando la regla de la mano derecha para determinar la polaridad de una bobina.

Rotación:

Explique cómo definió el sentido de rotación de la bobina móvil.

Respuesta:

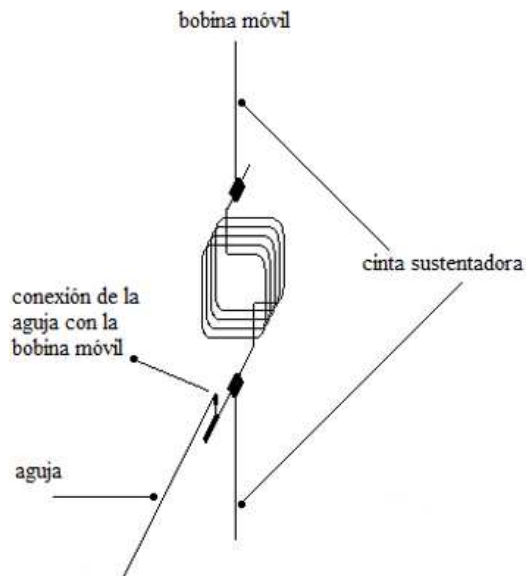


Figura a Bobina móvil sujeta de las cintas sustentadoras.

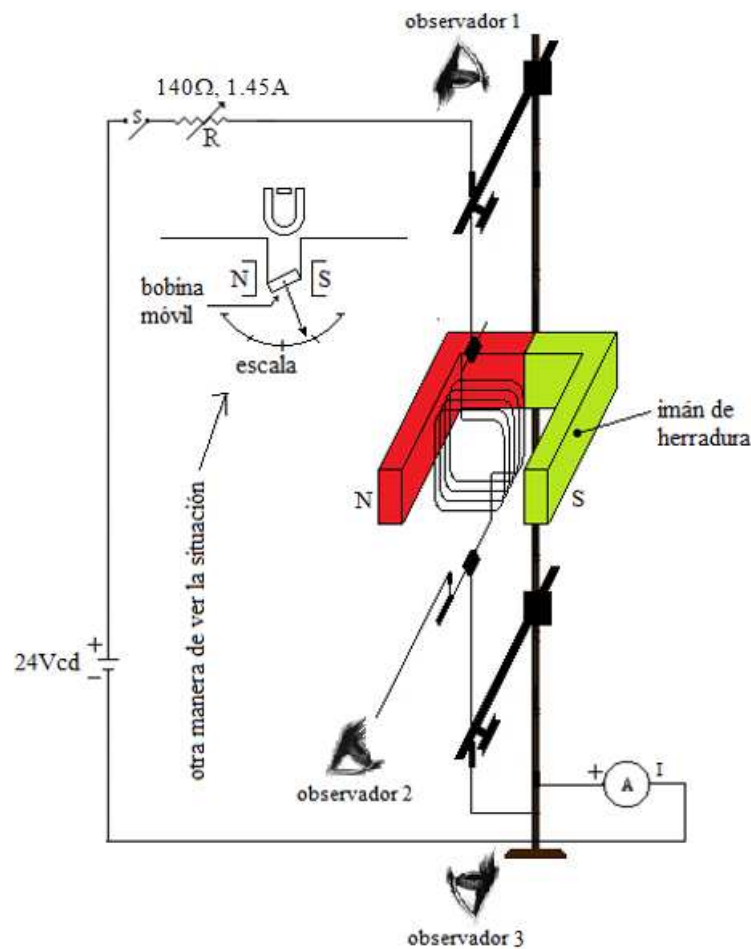


Figura b Análisis de las fuerzas que actúan sobre los lados de la bobina móvil sumergida en un campo magnético.

Verifique que la resistencia R esté en su resistencia máxima. Energice el circuito cerrando el interruptor s y modificando el valor de R verifique que $I = 1A$, abra el interruptor s y vuélvalo a cerrar, observe el efecto en la bobina móvil.

P1 ¿Al energizar la predicción 1 se cumplió?

Predicción 2 (considerando el observador 2). Aplique la regla de la mano derecha y determine la dirección de las fuerzas sobre cada uno de los lados de la bobina móvil a medida que gira. Use la tabla **a** y emplee una palomita para indicar la dirección de las fuerzas.

Tabla **a** Dirección de las fuerzas sobre cada uno de los lados de la bobina considerando el observador 2.

Lado a superior	
Hacia arriba	Hacia abajo
Lado a inferior	
Hacia arriba	Hacia abajo
Lado l izquierdo	
Hacia afuera de la página	Hacia adentro de la página
Lado l derecho	
Hacia afuera de la página	Hacia adentro de la página

Abra el interruptor s e intercambie los cables conectados a la bobina móvil, cierre el interruptor s y observe el efecto en la bobina móvil, **P2** ¿La dirección del movimiento cambió?

Intercambie la posición del imán, **P3** ¿La dirección del movimiento cambió?

P4 ¿Cuál es su predicción si el circuito se energiza con corriente alterna?

Objetivo 2

b)

Al energizar el sistema de la figura **b**, **P5** ¿Por qué el ángulo de giro de la bobina móvil está limitado a 90° ?

Al energizar el sistema de la figura **b**, **P6** ¿Cuál es la dirección del par generado?

Objetivo 3

c) La figura **c** muestra el prototipo “Máquina de Corriente Directa”.

De acuerdo con la figura **c**, **P7** ¿Si el prototipo se energiza (9Vcd) la armadura gira? Explique

P8 ¿Cómo podría eliminarse la función trigonométrica de la ecuación 11 para que el par siempre sea máximo?

Cambie la posición de la bobina y energice (9Vcd), **P9** ¿Porqué la dirección del par no cambia?

P10 ¿Cuál es el ángulo de giro para la conmutación sea óptima?

P11 ¿Qué sucede si la conmutación no es óptima?

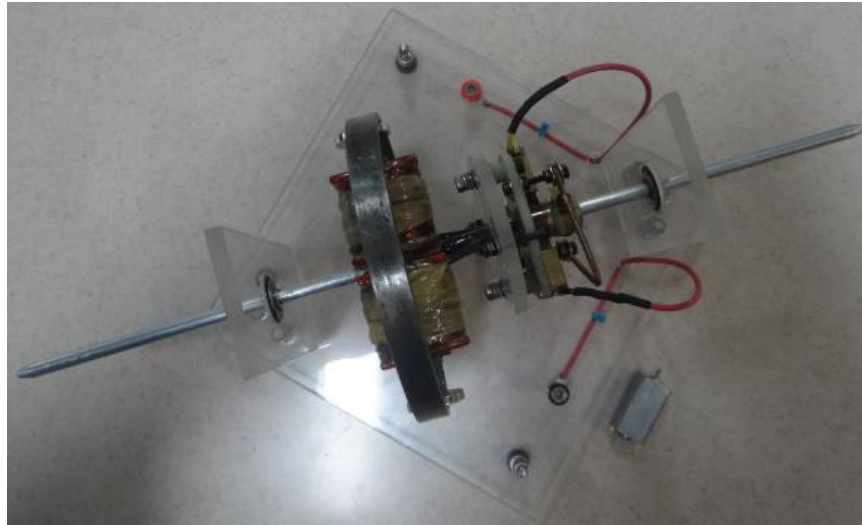


Figura c Prototipo “Máquina de corriente Directa”.

Sugerencias didácticas del experimento inicial:

En la figura b La corriente I no debe superar 1 A para evitar que las cintas sustentadoras se destruyan.

Reporte del equipo:

Ver la rúbrica para evaluar prácticas de laboratorio.

Referencia:

Diseño del complemento:

Práctica 1

“Tema 2” de la asignatura **“Máquinas Eléctricas”**

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Práctica 2

Análisis del generador de corriente directa y cálculo de su eficiencia

Para esta práctica se emplea el **complemento: Reto 2**.

Objetivos:

- 1 Determinación del plano neutro magnético al vacío y función de los polos de conmutación.
- 2 Estudio de las propiedades de los generadores en condiciones de vacío y de plena carga.
- 3 Calcular la eficiencia del dínamo con excitación independiente.
- 4 Determinación de las características de carga y de regulación de los dínamos.

Material y equipo necesario:

Equipo Lab-Volt:

- 2 Módulo de suministro de potencia EMS8821
- 4 Módulo de resistencias EMS8311
- 1 Máquina de corriente directa EMS8211
- 1 Máquina síncrona EMS8241
- 1 Banda

Equipo Microlab De Lorenzo:

Estator de la máquina de corriente directa

Otros:

- 1 punta magnética
- 3 Amperímetro de corriente directa
- 1 Amperímetro de gancho
- 1 Factorímetro
- 1 Galvanómetro con sistema motor magnetoeléctrico de bobina móvil
- Cables

Metodología:

Objetivo 1

a1) Determinación del plano neutro magnético al vacío.

Para esta metodología se usa la máquina de corriente directa del sistema electromecánico Lab-Volt mostrada en la figura [viii](#). Conecte el circuito mostrado en la figura [a](#).

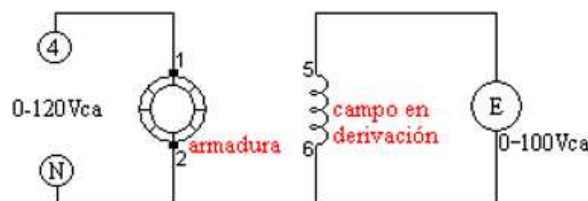


Figura [a](#) Determinación del plano neutro magnético al vacío.

Mueva la palanca de ajuste de las escobillas de la máquina de corriente directa del sistema electromecánico Lab-Volt hasta el extremo máximo en el sentido de las manecillas del reloj, figura b3.

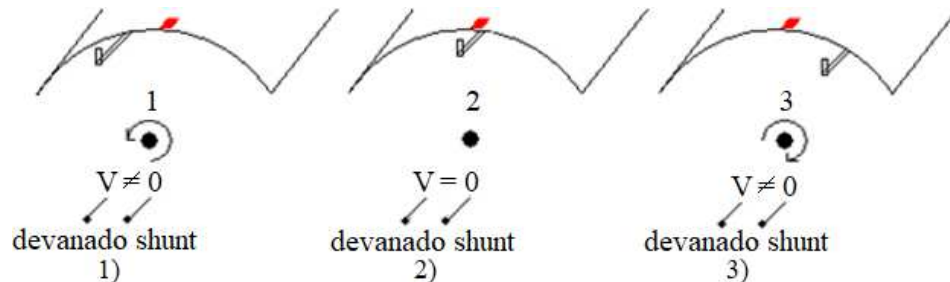


Figura b Posición de las escobillas para la determinación del plano neutro magnético al vacío.

Energice el circuito de la figura a y aumente lentamente el voltaje hasta que el voltímetro de corriente alterna conectado al devanado de campo en derivación indique 80Vca. Este voltaje se induce por acción de la corriente alterna que circula en la armadura.

Ahora, mueva la palanca de ajuste de las escobillas al extremo opuesto, figura b1.

Observará que el voltaje de corriente alterna inducido a través del campo disminuye a 0 (figura b2) y luego aumenta nuevamente conforme se llega a la otra posición.

Finalmente, mueva la palanca de ajuste de las escobillas hasta que el voltímetro indique 0V y desconecte la fuente de alimentación.

La determinación del plano neutro magnético al vacío (posición neutra de las escobillas ó plano neutro de conmutación al vacío) se determina aplicando un voltaje de corriente alterna a la armadura. Un voltímetro conectado en el devanado de campo en derivación medirá la fem inducida. Cuando la fuerza electromotriz inducida sea 0 se ha determinado la posición neutra de las escobillas.

Desconecte la fuente de alimentación.

Observación:

1 Físicamente el devanado por excitación serie está dispuesto en el "mimo lugar" que el devanado por excitación derivada, por lo que el experimento también se puede ejecutar empleando el devanado serie.

2 También es posible proceder aplicando tensión en corriente alterna al devanado derivado o serie y medir la tensión en la armadura, cuando el voltaje medido sea 0 se ha determinado la posición del plano neutro magnético al vacío.

3 La posición del plano neutro magnético al vacío también se puede determinar empleando corriente directa intercalando un interruptor entre la fuente de corriente directa y la armadura y conectando un galvanómetro (sistema motor magnetoeléctrico de bobina móvil) en el devanado

de campo derivado. Observará en el galvanómetro una serie de deflexiones de la aguja en sentido horario cuando se cierra el interruptor y en sentido anti horario cuando se abre (figura c). Cuando la aguja no se desplace se ha determinado la posición del plano neutro magnético la vacío.

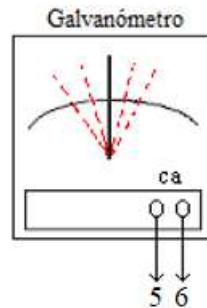


Figura c Deflexiones de la aguja de un galvanómetro con un sistema motor magnetoeléctrico de bobina móvil.

a2) Función de los polos de conmutación.

La figura d muestra el estator de la máquina de corriente directa Microlab De Lorenzo.

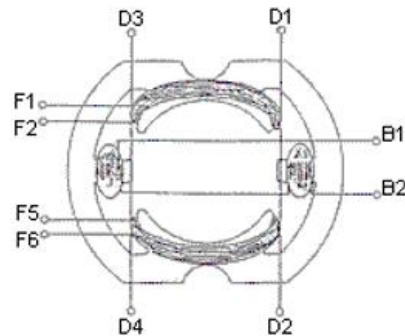


Figura d Estator de la máquina de corriente directa del sistema electromecánico Microlab De Lorenzo.

La masa magnética del estator de la máquina de corriente directa del sistema electromecánico Microlab De Lorenzo está construida por un paquete de láminas, largo 61mm y con un diámetro interno de 80mm, con dos polos principales y dos polos auxiliares o de conmutación.

Sobre los polos principales están envueltos:

Por excitación derivada (excitación separada o paralelo). 2 Bobinas, una por polo y no conectadas, con 350 vueltas, diámetro del conductor 0.455mm (cal 25), terminales F1-F2, F5-F6.

Por excitación serie. 28 vueltas, con dos conductores de diámetro 1.151mm (calibre 17) en paralelo, terminales D3-D4.

Por excitación compuesta. 5 vueltas, con dos conductores de 1.151mm de diámetro en paralelo, terminales D1-D2.

Sobre los polos auxiliares están envueltos:

61 vueltas, con dos conductores de diámetro de 1.15mm en paralelo, terminales B1-B2.

Conecte el circuito mostrado en la figura e.

Energice el circuito de la figura e1. Verifique por un lado la generación del flujo magnético por medio de electroimanes y por otro determinar la dirección del flujo magnético insertando la punta magnética entre los polos en correspondencia con el eje de la máquina.

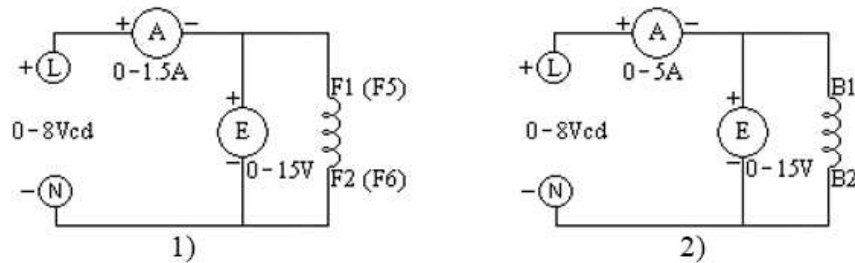


Figura e Flujo producido por los polos por excitación derivada y auxiliares.

La dirección del flujo generado se muestra mediante el pequeño imán en la figura f1.

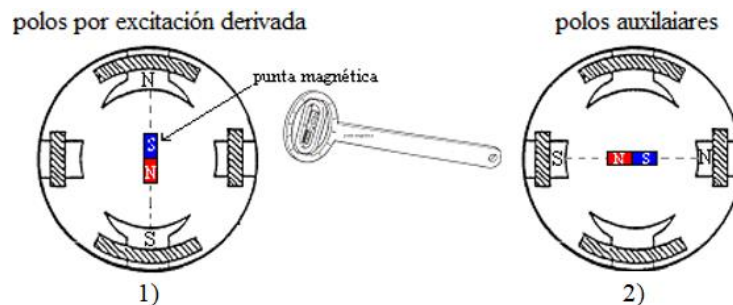


Figura f Dirección del flujo mediante el uso de la punta magnética.

Ahora, ejecute el experimento usando el circuito de la figura e2 y observe la dirección del flujo (figura f2).

Desconecte la fuente de alimentación.

Observación:

4 De acuerdo al Código Eléctrico Nacional la corriente máxima segura o no peligrosa para el calibre 25 es de 0.64A y para el calibre 17 es de 5A.

5 Después de desconectar la fuente de alimentación verifique usando la punta magnética que hay aún un pequeño flujo magnético debido al magnetismo residual.

6 La punta magnética permite desplegar el campo magnético mostrando la tendencia tridimensional y está compuesta por un pequeño imán suspendido en una armadura giratoria.

7 El soporte, la agarradera y los baleros de pivote de la punta magnética no tienen influencia en la indicación del imán. La punta magnética puede ser usada en cualquier posición u orientación del campo magnético bajo prueba. La dirección del campo magnético se muestra por el pequeño imán cuyo polo norte está de color rojo.

Conecte el circuito mostrado en la figura g.

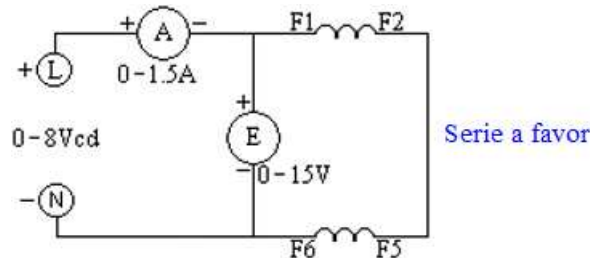


Figura g Flujo magnético principal. Conexión serie a favor.

Energice el circuito de lo figura g. Verifique por un lado la dirección del flujo magnético principal generado con electroimanes y por otro observe la distribución del flujo alrededor de las zonas de las zapatas de los polos, insertando la punta magnética entre los polos en correspondencia con el eje de la máquina.

La dirección del flujo principal se muestra mediante el pequeño imán en la figura h.

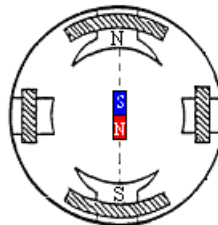


Figura h Dirección del flujo principal.

Ahora, mueva la punta magnética alrededor de las zapatas de los polos y verifique la dirección del flujo en correspondencia de las terminales del polo: esta dirección es radial (figura i).

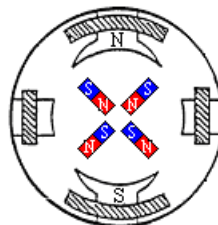


Figura i Flujos magnético alrededor de las zapatas de los polos.

Desconecte la fuente de alimentación.

Conecte el circuito mostrado en la figura j.

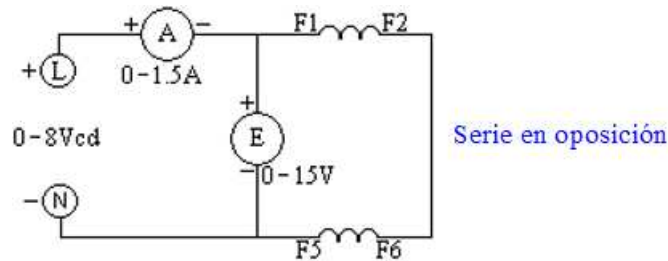


Figura j Flujo magnético principal. Conexión serie en oposición.

Energice el circuito de la figura j. Inserte la punta magnética entre los polos en correspondencia con el eje de la máquina. La dirección del flujo principal se muestra mediante el pequeño imán en la figura k. Verifique como en éstas condiciones, el flujo resultante en correspondencia con el eje de la máquina es "casi nulo" debido a que los polos crean y presentan la misma polaridad.

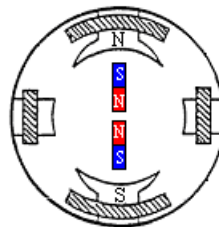


Figura k Flujo magnético resultante "casi nulo" en correspondencia con el eje de la máquina.

Desconecte la fuente de alimentación.

Conecte el circuito mostrado en la figura l.

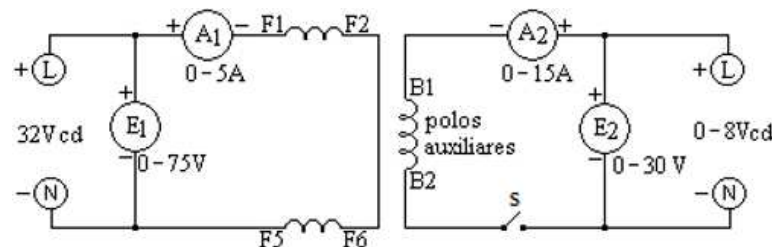
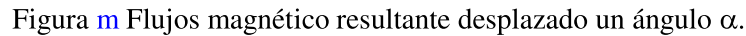


Figura l Efecto de los polos de conmutación (efecto del interpolo).

Energice el circuito de la figura l. Haga que la corriente por el devanado de campo derivado sea de 0.64A. Inserte la punta magnética entre los polos en correspondencia con el eje de la máquina. Observe la punta magnética y cierre el interruptor s, haga que la corriente por los polos de conmutación sea de 4A. Abra el interruptor s y vuélvalo a cerrar.

Verifique que el flujo magnético que resulta se desplazó un ángulo α (figura m) con respecto al campo magnético producido por el devanado principal (flujo producido por el campo en derivación).



Máquinas Eléctricas

inducir una fuerza electromotriz opuesta a la autoinducida a la corriente de conmutación. En este caso las escobillas se pueden mantener fijas, en cualquier condición de carga, en la posición correspondiente del eje neutro al vacío.

Objetivo 2

Para registrar y calcular valores use el **complemento: Reto 2**.

Para los experimentos de los objetivos 2, 3 y 4 se usa la máquina de corriente directa del sistema electromecánico Lab-Volt EMS8211 mostrada en la figura [viii](#). El dato de placa se muestra en la tabla [iv](#).

Observación:

9 La máquina de corriente directa Lab-Volt no posee polos auxiliares, por lo que por efecto de la carga el plano neutro magnético se desplaza un ángulo α con respecto al plano neutro geométrico, estableciéndose una tensión entre las delgas del colector que tiene como consecuencia un chisporroteo. Es sumamente importante que el generador de corriente directa se opere colocando las escobillas en el plano neutro magnético geométrico.

10 El motor síncrono arranca como motor de inducción y posteriormente entra en sincronismo. El devanado de campo de corriente directa del motor síncrono se aplica solo cuando la máquina ha alcanzado su velocidad.

11 El motor síncrono debe operar con la corriente de excitación normal a un factor de potencia unitario (conecte un factorímetro).

12 El grupo motor-generador se acopla mediante una banda.

b) *Generador de corriente directa con excitación independiente.*

Conecte el circuito mostrado en la figura [n](#).

Energice el sistema. Varíe la corriente de campo en derivación I_f (A_2), haciendo girar la perilla de control del voltaje de la fuente de alimentación y verifique que el voltaje de armadura E_a varía.

Verifique que la corriente de campo en derivación $I_f = 0A$.

Observación:

13 Aun cuando no se aplique voltaje al devanado de campo derivado, existe un campo magnético débil, a causa del flujo residual del estator y dado que el rotor del generador gira en ese campo magnético se induce un voltaje de armadura pequeño.

14 Si se desean lecturas negativas de E_a solo se invierte la polaridad del devanado de campo en derivación intercambiando los cables a las terminales 5 y 6 del generador de corriente directa o cambiando la secuencia de fase del motor síncrono.

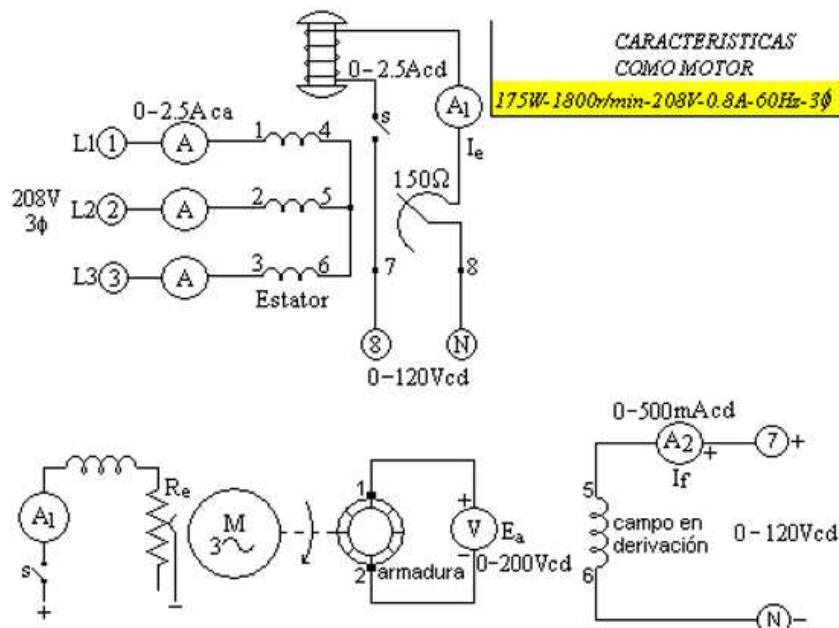


Figura n Generador en derivación con excitación independiente.
Grupo motor-generator Lab-Volt.

Conecte al circuito de la figura o un módulo de resistencias colocando los interruptores de resistencia de tal modo que la resistencia total sea de 120 Ω . Ajuste la corriente de campo en derivación I_f , hasta que el generador proporcione un voltaje de salida de $E_a = 120V$. Mida y anote los valores indicados en la tabla a.

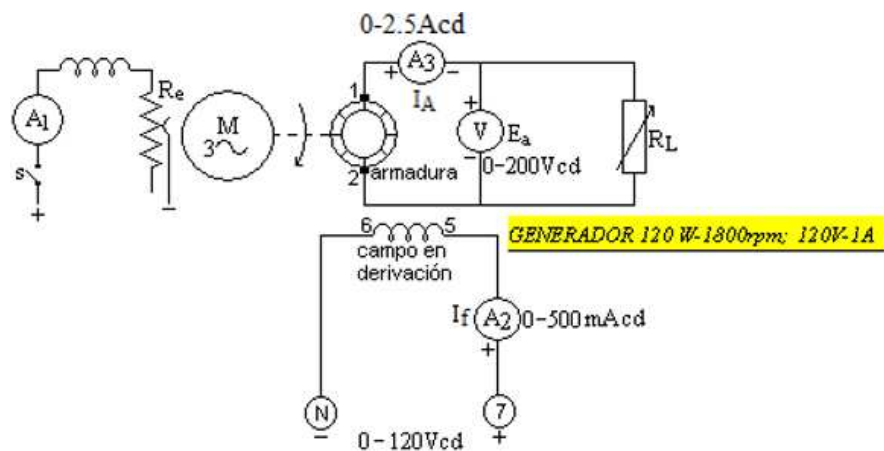


Figura o Conexión del módulo de resistencias al devanado de armadura del generador de corriente directa.

Tabla a Valores medidos. Ajuste correcto de la corriente de campo I_f . $E_a = 120V$.

I_f (A)	I_A (A)

Esta es la corriente de campo I_f (tabla a) nominal a la potencia nominal de salida $P = (120V \times 1A) = 120W$ del generador de corriente directa.

Ajuste la resistencia de carga tantas veces como sea necesario para obtener cada uno de los valores que aparecen en la tabla b. La corriente de campo I_f nominal no debe variar (mediante el uso de la perilla de control del voltaje de la fuente de alimentación ajuste eventualmente el valor al preestablecido).

Tabla b Valores medidos. **Característica de carga** (E_a vs I_A).
Generador de corriente directa con **excitación independiente**.

$R_L (\Omega)$	$E_a (V)$	$I_A (A)$
∞		
600		
300		
200		
150		
120		
100		
85		
75		

Observación:

15 Aunque el valor nominal de la corriente de salida del generador es 1A corriente directa, puede cargarse hasta 1.5A corriente directa (50% de sobrecarga) sin dañarlo.

Calcule la potencia eléctrica P que entrega el generador para cada valor de carga y calcule el % de regulación de voltaje usando la ecuación a. Registre los valores en la tabla c.

$$\% \text{ regulación de voltaje} = \left[\frac{\text{volt en vacío} - \text{volt a plena carga}}{\text{volt en vacío}} \right] (100) \quad \text{a}$$

Tabla c Valores calculados. **Característica de carga**. Potencia P y % de regulación de voltaje para cada valor de carga.

Generador de corriente directa con **excitación independiente**.

$R_L (\Omega)$	$P (W)$	% de regulación de voltaje
∞		
600		
.		
75		

Con la resistencia de carga ajustada a una corriente de salida I_A de 1.5A, conecte y desconecte el cable de conexión de la terminal 6 del generador de c, **P1** ¿Nota que el motor propulsor funciona con mayor dificultad cuando el generador entrega potencia a la carga?

Verifique que la corriente de campo en derivación $I_f = 0A$.

Conecte en cortocircuito total la armadura (terminales 1 y 2). Incremente gradualmente la corriente de campo I_f hasta que el motor se pare. Desconecte inmediatamente la fuente de energía. El valor de la corriente de campo en derivación I_f que se requiere para parar el motor es:

$$I_f = \underline{\hspace{2cm}}$$

Observación:

16 Puede conectarse en cortocircuito total la armadura e incrementar gradualmente la corriente en el devanado derivado hasta que el motor propulsor se pare. Un aspecto importante en esta prueba es el valor de la resistencia de la armadura ya que este valor determinará la corriente que circulará a través de ella (se produce un efecto de frenado tan fuerte que se parará el motor, $I_A > 3A$). Esta prueba puede ser destructiva para máquinas con resistencia de armadura pequeñas.

Elimine el cortocircuito y tire la carga conectada al generador de corriente directa.

Determine la característica de regulación. La corriente de campo I_f debe cambiar. Mediante el uso de la perilla de control del voltaje de la fuente de alimentación haga los ajustes necesarios para mantener $E_a = 120V$.

Ajuste la resistencia de carga tantas veces como sea necesario para obtener cada uno de los valores que aparecen en la tabla d.

Tabla d Valores medidos. **Característica de regulación** (E_a vs I_A). $E_a = 120V$.
Generador de corriente directa con **excitación independiente**.

$R_L (\Omega)$	$I_f (V)$	$I_A (A)$
∞		
600		
.		
75		

Desenergice el sistema.

Calcule la potencia eléctrica P que entrega el generador para cada valor de carga y calcule el % de regulación de voltaje usando la ecuación a. Registre los valores en la tabla e.

Tabla e Valores calculados. **Característica de regulación**. Potencia P y % de regulación de voltaje para cada valor de carga.

Generador de corriente directa con **excitación independiente**.

$R_L (\Omega)$	$P (W)$	% de regulación de voltaje
∞		
600		
.		
75		

Generador de corriente directa con autoexcitación derivada.

Use el circuito de la figura o y conecte el generador de corriente directa con autoexcitación derivada. Indique en la tabla x el ajuste correcto de la corriente de campo I_f para que $E_a = 120V$.

Tabla x Valores medidos. Ajuste correcto de la corriente de campo I_f para que $E_a = 120V$.

I_f (A)	I_a (A)

No toque el control del reóstato de campo en derivación durante el resto del experimento. Desconecte la carga. Mida y registre los valores indicados en la tabla y para cada valor de carga R_L .

Tabla y Valores medidos. **Característica de carga** (E_a vs I_a).
Generador de corriente directa con **autoexcitación derivada**.

R_L (Ω)	E_a (V)	I_a (A)
∞		
600		
.		
75		

Calcule la potencia eléctrica P que entrega el generador para cada valor de carga y calcule el % de regulación de voltaje usando la ecuación a. Registre los valores en la tabla z.

Desenergice el sistema.

Tabla z Valores calculados. **Característica de carga**. Potencia P y % de regulación de voltaje para cada valor de carga.

Generador de corriente directa con **autoexcitación derivada**.

R_L (Ω)	P (W)	% de regulación de voltaje
∞		
600		
.		
75		

Generador de corriente directa con excitación compuesta.

La figura p muestra de manera simplificada un generador de corriente directa con excitación compuesta a) paralelo corto y b) paralelo largo.

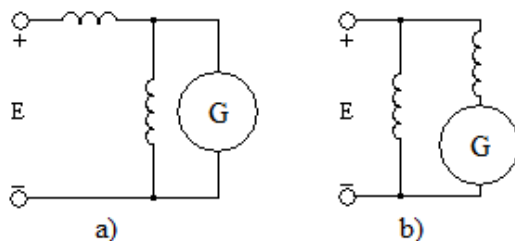


Figura p Generador de corriente directa con excitación compuesta a) paralelo corto y b) paralelo largo.

El circuito mostrado en la figura q define un generador con excitación compuesta, como puede ver se trata de un generador paralelo corto que puede ser acumulativo o diferencial.

Conecte el circuito mostrado en la figura q.

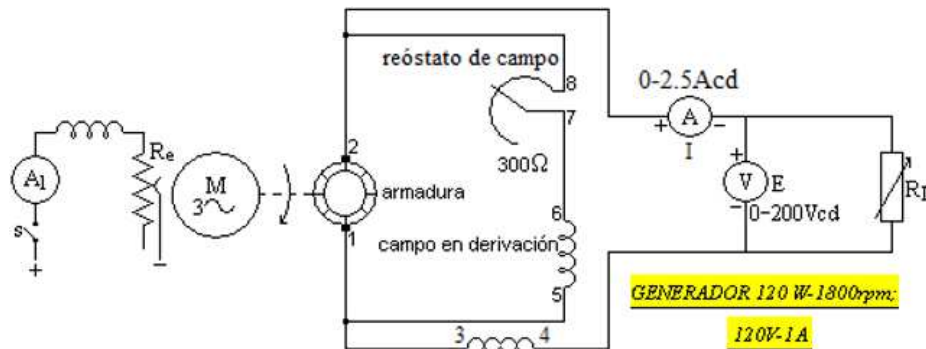


Figura q Generador con excitación compuesta paralelo corto (acumulativo o diferencial).

Observación:

17 Verifique que el generador de corriente directa con excitación compuesta **paralelo corto sea acumulativo**, use la siguiente metodología:

- Verifique que todos los interruptores de las resistencias estén abiertos (condición de vacío, $R_L = \infty$).
- Gire el reóstato de campo hacia su posición de resistencia mínima.
- Energice el sistema. Con el sistema girando observe si aumenta el voltaje de salida E.
- Si no es así, desenergice el sistema y cambie la secuencia de fase del motor síncrono o intercambie los cables del campo en derivación.
- Modifique la posición del reóstato de campo y verifique que E varía.
- Ajuste el reóstato de campo a un voltaje de salida $E = 120V$, $R_L = \infty$, $I = 0$ (condición de vacío).

No toque el reóstato de campo durante la prueba. Ajuste la resistencia de carga tantas veces como sea necesario para obtener cada uno de los valores que aparecen en la tabla f.

Tabla f Valores medidos. **Característica de carga (E vs I).**
Generador de corriente directa con excitación compuesta **paralelo corto acumulativo**.

$R_L (\Omega)$	E (V)	I (A)
∞		
600		
.		
75		

Calcule la potencia eléctrica P que entrega el generador para cada valor de carga y calcule el % de regulación de voltaje usando la ecuación **a**. Registre los valores en la tabla **g**.

Tabla **g** Valores calculados. **Característica de carga.** Potencia P y % de regulación de voltaje para cada valor de carga.

Generador de corriente directa con excitación compuesta **paralelo corto acumulativo**.

R_L (Ω)	P (W)	% de regulación de voltaje
∞		
600		
.		
75		

Conecte el generador de corriente directa con excitación compuesta paralelo largo y use la observación 17 “1-6” para que el generador sea compuesto **paralelo largo diferencial**.

No toque el reóstato de campo durante el resto de la prueba. Ajuste la resistencia de carga tantas veces como sea necesario para obtener cada uno de los valores que aparecen en la tabla **h**.

Tabla **h** Valores medidos. **Característica de carga** (E vs I).

Generador de corriente directa con excitación compuesta **paralelo largo diferencial**.

R_L (Ω)	E (V)	I (A)
∞		
600		
.		
75		

Desenergice el sistema.

Calcule la potencia eléctrica P que entrega el generador para cada valor de carga y calcule el % de regulación de voltaje usando la ecuación **a**. Registre los valores en la tabla **i**.

Tabla **i** Valores calculados. **Característica de carga.** Potencia P y % de regulación de voltaje para cada valor de carga.

Generador de corriente directa con excitación compuesta **paralelo largo diferencial**.

R_L (Ω)	P (W)	% de regulación de voltaje
∞		
600		
.		
75		

Generador de corriente directa con autoexcitación serie.

Conecte el circuito mostrado en la figura **r**.

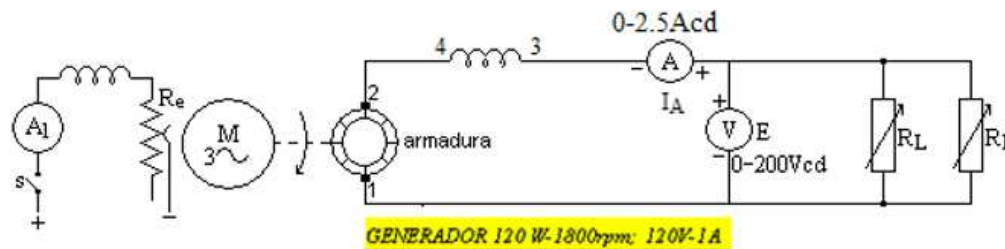


Figura r Generador con excitación serie.

Verifique que todos los interruptores de las resistencias estén abiertos (condición de vacío, $R_L = \infty$).

Energice el sistema y mida el voltaje de salida del generador E.

$$E =$$

Conecte una carga de 28.7Ω y observe si E aumenta. Si no es así, tire la carga e intercambie los cables del campo serie en las terminales 3 y 4.

Ajuste la resistencia de carga tantas veces como sea necesario para obtener cada uno de los valores que aparecen en la tabla j.

Tabla j Valores medidos. **Característica de carga** (E vs I_A).
Generador de corriente directa con **excitación serie**.

$R_L (\Omega)$	E (V)	I_A (A)
∞		
40		
37.5		
35.3		
33.3		
31.5		
30		
28.5		

Calcule la potencia eléctrica P que entrega el generador para cada valor de carga y calcule el % de regulación de voltaje usando la ecuación a. Registre los valores en la tabla k.

Tabla k Valores calculados. **Característica de carga**. Potencia P y % de regulación de voltaje para cada valor de carga.

Generador de corriente directa con **excitación serie**.

$R_L (\Omega)$	P (W)	% de regulación de voltaje
∞		
40		
.		
28.5		

Los generadores de corriente directa con excitación serie *no se utilizan como fuente de potencia*, se utilizan en sistemas de distribución de corriente directa como elevadores de voltaje de línea.

Conecte el circuito mostrado en la figura s. Use otro módulo de suministro de potencia.

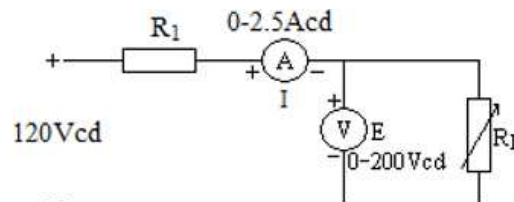


Figura s Línea de transmisión excitada con una fuente de corriente directa.

Coloque los interruptores para que $R_L = 28.5\Omega$. R_L representa la resistencia de una línea de transmisión.

Verifique que todos los interruptores de la resistencia R_L estén abiertos (condición de vacío, $R_L = \infty$).

Energice el circuito y ajuste la resistencia R_L tantas veces como sea necesario para obtener cada uno de los valores que aparecen en la tabla l.

Observación:

18 Verifique que el voltaje de la fuente de alimentación sea 120Vcd para cada valor de carga de la tabla l.

Tabla l Valores medidos. Línea de transmisión excitada con una fuente de corriente directa.

$R_L (\Omega)$	E (V)	I (A)
∞		
600		
240		
150		
100		
80		

Calcule el % de regulación de voltaje usando la ecuación a. Registre los valores en la tabla m.

Tabla m Valores calculados. % de regulación de voltaje de la línea de transmisión excitada con una fuente de corriente directa.

$R_L (\Omega)$	% de regulación de voltaje
∞	
600	
.	
80	

La regulación de la línea de condición de vacío a condición de plena carga es muy alta.

Conecte el circuito mostrado en la figura t.

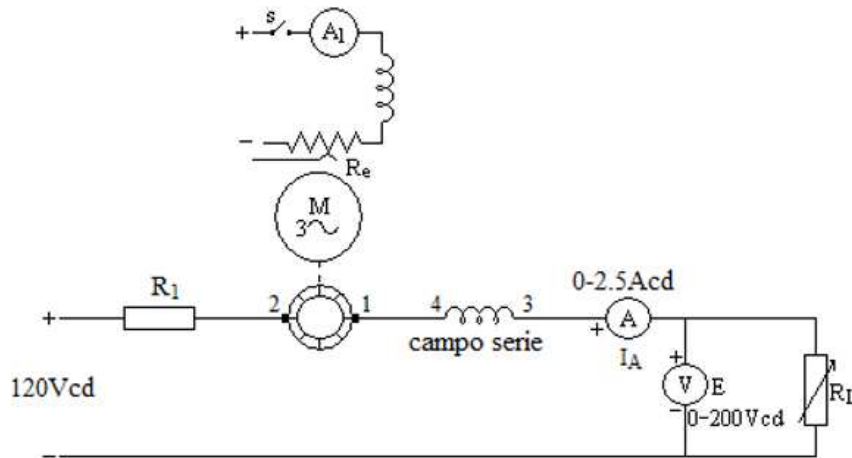


Figura t Generador con excitación serie como regulador de tensión.

Considerando que $R_1 = 28.5\Omega$ y que todos los interruptores de la resistencia R_L estén abiertos, energice el sistema.

Considere la observación 18 y ajuste la resistencia R_L tantas veces como sea necesario para obtener cada uno de los valores que aparecen en la tabla n.

Observación:

19 Si los valores medidos de la tensión E en la tabla n son menores que los medidos en la tabla l entonces tire la carga e intercambie las conexiones que van al devanado de campo serie.

Tabla n Valores medidos.
Generador con excitación serie como regulador de tensión.

$R_L (\Omega)$	$E (V)$	$I_A (A)$
∞		
600		
240		
150		
100		
80		

Desenergice el sistema.

Ejecute el siguiente experimento.

Tire la carga R_L .

Verifique el sentido de rotación del motor síncrono.

Desenergice el motor síncrono y mueva el interruptor correspondiente en el devanado de campo de la máquina síncrona.

Mantenga el voltaje de corriente directa en 120V y conecte la carga R_L subiendo el interruptor de 300Ω , luego el 600Ω , luego el de 1200Ω y luego otro de 300Ω .

Podrá verificar que la máquina de corriente directa opera como un motor, el rotor de la máquina gira. Para que el generador de corriente directa opere como un regulador, el sentido de rotación del motor de corriente directa debe ser contrario al del motor impulsor.

Si el generador de corriente directa no regula el sentido de rotación de los motores es el mismo.

Calcule el % de regulación de voltaje usando la ecuación a. Registre los valores en la tabla o.

Tabla o Valores calculados. % de regulación de voltaje de la línea de transmisión. Generador con **excitación serie** como regulador de tensión.

R_L (Ω)	% de regulación de voltaje
∞	
600	
.	
80	

Observación:

20 El % de regulación de tensión de condición de vacío a plena carga para la tabla o es menor que el % de regulación de voltaje de condición de vacío a plena carga para la tabla m, lo que implica que el generador con excitación serie opere como regulador de tensión.

Objetivo 3

Para calcular y graficar use el **complemento: Reto 2**.

c)

Generador de corriente directa con excitación independiente.

Para la **característica de carga**:

Calcule la eficiencia del dínamo. Muestra los resultados en la tabla p.

Tabla p Eficiencia del generador de corriente directa con **excitación independiente**.

Característica de carga.

Insertar tabla

Grafique I_f vs I_A (figura u), P_d vs P (figura v) y η vs I_A (figura w).

Insertar figura

Figura u I_f vs I_A . Generador de corriente directa con **excitación independiente**.

Característica de carga.

Insertar figura

Figura v P_d vs P . Generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de carga.

Insertar figura

Figura w η vs I_A . Generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de carga.

Para la **característica de regulación**:

Calcule la eficiencia del dínamo. Muestra los resultados en la tabla q.

Tabla q Eficiencia del generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de regulación.

Insertar tabla

Grafique I_f vs I_A (figura x), P_d vs P (figura y) y η vs I_A (figura z).

Insertar figura

Figura x I_f vs I_A . Generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de regulación.

Insertar figura

Figura y P_d vs P . Generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de regulación.

Insertar figura

Figura z η vs I_A . Generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de regulación.

Objetivo 4

Para graficar use el **complemento: Reto 2**.

Generador de corriente directa con excitación independiente.

Grafique la característica de carga, voltaje de armadura E_a como función de la corriente de armadura I_A , (Figura aa).

Insertar figura

Figura aa E_a vs I_A . Generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de carga.

Grafique la característica de regulación, voltaje de armadura E_a como función de la corriente de armadura I_A , (Figura ab).

Insertar figura

Figura **ab** E_a vs I_A . Generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de regulación.

Generador de corriente directa con autoexcitación derivada.

Grafique la característica de carga, voltaje de salida E como función de la corriente suministrada a la carga I_a , (Figura **ac**).

Insertar figura

Figura **ac** E_a vs I_A . Generador de corriente directa con **autoexcitación derivada**.
Característica de carga.

Generador de corriente directa con excitación compuesta.

Para el generador de corriente directa con excitación compuesta paralelo corto acumulativo. Grafique la característica de carga, voltaje de salida E como función de la corriente suministrada a la carga I , (figura **ad**).

Insertar figura

Figura **ad** E vs I . Generador de corriente directa con **autoexcitación compuesta paralelo corto acumulativo**. **Característica de carga.**

Para el generador de corriente directa con excitación compuesta paralelo largo diferencial. Grafique la característica de carga, voltaje de salida E como función de la corriente suministrada a la carga I , (figura **ae**).

Insertar figura

Figura **ae** E vs I . Generador de corriente directa con **autoexcitación compuesta paralelo largo diferencial**. **Característica de carga.**

Generador de corriente directa con autoexcitación serie.

Para el generador de corriente directa con excitación serie. Grafique la característica de carga (use los valores de la tabla **j**), voltaje de salida E como función de la corriente suministrada a la carga I_A , (figura **af**).

Insertar figura

Figura **af** E vs I_A . Generador de corriente directa con **excitación serie**.
Característica de carga.

Muestre en la figura **ag** las características de carga de los generadores de corriente directa.

Insertar figura

Figura **ag** Características de carga de los generadores de corriente directa.
Características de carga.

Sugerencias didácticas

Construir el **complemento: Reto 2** para analizar el generador de corriente directa es importante porque permite analizar el modelo matemático propuesto por el profesor y aplicarlo satisfactoriamente a la práctica de laboratorio. La herramienta computacional ofrece resultados al instante (datos, cálculos y gráficas), permitiendo discutir con el alumno para que se apodere del conocimiento.

Reporte del equipo:

Ver la rúbrica para evaluar prácticas de laboratorio.

Referencias:

Diseño del complemento: Práctica 2

“Tema 2” de la asignatura **“Máquinas Eléctricas”**

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Experimento de laboratorio No. 27 “El generador en derivación de cd con excitación independiente”,

28 “El generador en derivación de cd con autoexcitación”,

29 “El generador de cd compuesto”

y 30 “El generador de cd en serie”:

Experimentos base para el diseño del complemento: Práctica 2

EXPERIMENTOS CON EQUIPO ELÉCTRICO

Theodore Wildi, Michael J. De Vito

Editorial Limusa, México. 1975

Lab-Volt, Sistemas Educativos

Práctica 3

Determinación del dato nominal del motor de corriente directa, características electromecánicas y cálculo de su eficiencia

Para esta práctica se emplea el **complemento: Reto 3**.

Objetivos:

- 1 Arranque de los motores de corriente directa.
- 2 Control de velocidad de los motores de corriente directa.
- 3 Analizar la característica mecánica y características electromecánicas para determinar las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio de los motores de corriente directa.
- 4 Cálculo de la eficiencia de los motores de corriente directa.

Material y equipo necesario:

Equipo Lab-Volt

- 2 Módulo de suministro de potencia EMS8821
- 1 Máquina de corriente directa EMS8211
- 1 Electrodinamómetro EMS8911
- 1 Banda

Otros:

- 1 Amperímetro de corriente directa
- 1 Amperímetro de corriente directa
- 1 Tacómetro
- 1 Interruptor 1 polo 1 tiro
- 2 Multímetro
- Cables

Metodología:

Para registrar valores calcular y graficar use el **complemento: Reto 3**.

En esta práctica de laboratorio se usa la máquina de corriente directa del sistema electromecánico Lab-Volt EMS8211 mostrada en la figura **viii**. Las cantidades eléctricas y mecánicas en operación normal del motor de corriente directa propuestas por el fabricante se muestran en la tabla **viii**.

Observación:

1 La máquina de corriente directa no posee polos auxiliares, por lo que por efecto de la carga el plano neutro magnético se desplaza un ángulo α con respecto al plano neutro geométrico, estableciéndose una tensión entre las delgas del colector que tiene como consecuencia un chisporroteo. Es sumamente importante que el motor de corriente directa se opere colocando las escobillas en el plano neutro magnético al vacío.

2 El grupo motor-freno se acopla mediante una banda.

3 La figura a muestra el electrodinamómetro (freno) del sistema electromecánico Lab-Volt EMS8911. Las características técnicas del electrodinamómetro se muestran en la tabla a.



Figura a Electrodinamómetro (freno) del sistema electromecánico Lab-Volt EMS8911.

Tabla a Características técnicas del electrodinamómetro del sistema electromecánico Lb-Volt EMS8911.

Velocidad n (rev/min)	Par τ (lbf·plg)
0-5000	0-27

Motor de corriente directa con excitación derivada

Objetivo 1 MD Conecte el circuito mostrado en la figura b.

Ajuste el reóstato de campo a la resistencia mínima en el momento del arranque. Bajo estas condiciones, la corriente que circula por el devanado de campo en derivación es la máxima y la velocidad del rotor es la mínima.

Verifique carga mínima ($I_{\text{freno}} = 0\text{A}$) en el momento del arranque a través de la perilla del electrodinamómetro.

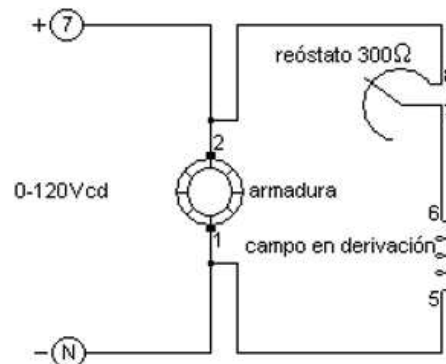


Figura b Motor de corriente directa con **excitación derivada**.

Objetivo 2 MD Energice el circuito y ajuste el voltaje aplicado al motor $E = 120\text{V}$.

Use un tacómetro para medir la velocidad del motor.

$n_{\text{resistencia mínima}} =$

Ajuste el reóstato a la resistencia máxima y mida la velocidad.

$n_{\text{resistencia máxima}} =$

Ajuste el reóstato a la resistencia mínima y abra **momentáneamente** el circuito de campo en derivación, quitando el cable de conexión de una de las terminales del devanado de campo en derivación (5 ó 6). ***Este listo para cortar inmediatamente la energía aplicada al motor desconectando la fuente de energía.***

“Los motores de corriente directa en derivación usan detectores de pérdida de campo que previenen la velocidad excesiva del motor y posible destrucción”

Observación:

4 El motor de corriente directa del sistema electromecánico Lab-Volt, ha sido diseñado para soportar posibles condiciones de exceso de velocidad.

5 Si solo se intercambian las terminales de la fuente (figura c) la dirección de rotación sigue siendo la misma. La corriente cambio su dirección en ambos devanados y el rotor de la máquina no invierte su sentido de rotación. Recuerde que la dirección de rotación se invierte si las conexiones de la armadura o devanado de campo en derivación se invierten.

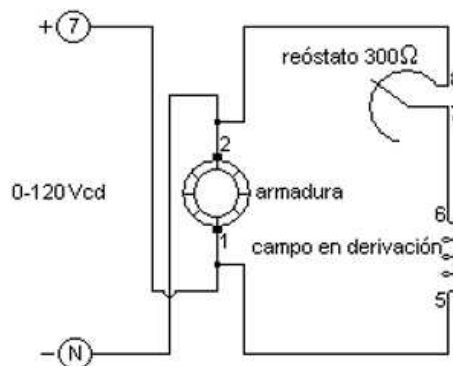


Figura c Inversión de las terminales en la fuente de alimentación.

Ajuste el reóstato de campo en derivación para que $n = 1800\text{rpm}$ en condición de vacío y verifique $E = 120\text{V}$ y que el sentido de rotación del sistema sea a la derecha con el propósito de medir valores de par τ .

Observación:

6 Para un par exacto de $0\text{lb}\cdot\text{plg}$, desacople el motor del electrodinamómetro.

Aplique carga al motor considerando los valores de τ de acuerdo con la tabla a. Para los valores de carga considerados verifique $E = 120V$ (no toque el reóstato de campo durante la prueba).

Tabla a Valores medidos. Motor de corriente directa con **excitación derivada**. $E = 120V$.

τ	I	n
lb·plg	A	rpm
0		
1.5		
3		
4.5		
6		
7.5		
9		
10.5		
12		

Tire la carga y desconecte la fuente de alimentación. Coloque el reóstato de campo en resistencia mínima y verifique carga cero ($I_{freno} = 0A$), para un arranque futuro.

Calcule las cantidades indicadas en la tabla b.

Tabla b Valores calculados. Eficiencia del motor de corriente directa con **excitación derivada**.
 $E = 120V$.

τ	$P_{eléctrica}$	$P_{mecánica}$	η	% reg velocidad
lb·plg	W	W	%	
0				
1.5				
.				
12				

Objetivo 3 MD Grafique la característica mecánica: par como función de la velocidad (figura d) y grafique las características electromecánicas: curvas de par (figura e), de velocidad (figura f), de la potencia de salida (figura g) y de la eficiencia como función de la corriente absorbida (figura h).

Insertar figura

Figura d Par como función de la velocidad (τ vs n).
Motor de corriente directa con **excitación derivada**.

Insertar figura

Figura e Par como función de la corriente absorbida (τ vs I).
Motor de corriente directa con **excitación derivada**.

Insertar figura

Figura f Velocidad como función de la corriente absorbida (n vs I).
Motor de corriente directa con **excitación derivada**.

Insertar figura

Figura g Potencia de salida como función de la corriente absorbida (P_m vs I).
Motor de corriente directa con **excitación derivada**.

Insertar figura

Figura h Eficiencia como función de la corriente absorbida (η vs I).
Motor de corriente directa con **excitación derivada**.

Proponga usando los valores medidos y calculados las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio del motor de corriente directa con excitación derivada (tabla c).

Tabla c Propuesta. Cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio del motor de corriente directa con **excitación derivada**.

Voltaje promedio	Corriente promedio	Potencia promedio	Velocidad
E (V)	I (A)	P (W)	n (rpm)

P1 ¿Por qué no coinciden los valores de la tabla c contra los valores de la tabla viii?

Observación:

7 El experimento propuesto permite proponer un dato de placa que no es el propuesto por el fabricante ya que la velocidad para la potencia mecánica especificada no es 1800rpm.

Para que los datos de placa (propuesto y fabricante) sean comparativamente iguales, **P2** ¿Cómo debería conducirse el experimento? Explique

Metodología ✓:

*"Definición del $\tau_{arranque}$ y $I_{arranque}$ del motor de corriente directa con **excitación derivada**"*

Verifique que el voltaje de la fuente de alimentación sea 0V.

Ajuste el reóstato de campo a la resistencia mínima.

El freno debe proporcionar la carga máxima, gire la perilla hacia la posición correspondiente.

Incremento lentamente el voltaje de la fuente de alimentación hasta que $I = 3A$. Mida y anote los valores indicados en la tabla d.

Tabla d Valores medidos. Motor de corriente directa con **excitación derivada**. $I = 3A$.

E	τ
V	lb _{rplg}

Observación:

8 El freno proporciona la carga máxima. Si el rotor del motor gira, párelo usando un guante.

Reduzca a cero el voltaje y desconecte la fuente de alimentación.

Calcule el $\tau_{\text{máximo}}$ del motor de corriente directa con excitación derivada cuando se aplica el voltaje nominal $E = 120\text{V}$.

$$\tau_{\text{máximo excitación derivada}} =$$

Calcule la resistencia equivalente del motor de corriente directa con excitación derivada.

$$R_{\text{equivalente excitación derivada}} =$$

Calcule la corriente de arranque I_{arranque} del motor de corriente directa con excitación derivada cuando se aplica el voltaje nominal $E = 120\text{V}$.

$$I_{\text{arranque excitación derivada}} =$$

Objetivo 4 MD Use la tabla **iii** y calcule las pérdidas y la eficiencia del motor con **excitación derivada**, muestre los resultados en la tabla **f**.

Tabla **f** Pérdidas y cálculo de la eficiencia usando la tabla **iii**. Motor de corriente directa con **excitación derivada**.
Insertar tabla

Muestre en la figura **i** la comparación entre las eficiencias calculadas con el experimento y con el modelo matemático de la tabla **iii**.

Insertar grafica

Figura **i** Comparación entre las eficiencias (experimento y modelo matemático).
Motor de corriente directa con **excitación derivada**.

Motor de corriente directa con excitación serie

Objetivo 1 MS Conecte el circuito mostrado en la figura **j**.

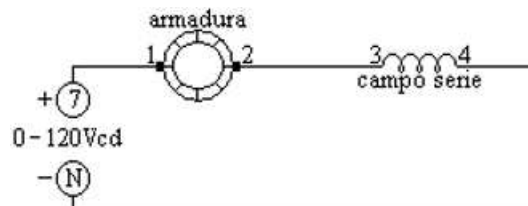


Figura **j** Motor de corriente directa con **excitación serie**.

Desacople el motor del freno.

Objetivo 2 MS Energice el circuito y ajuste $E = 120V$ en el menor tiempo posible (vea la observación 4).

Pídale a un compañero apoyo para medir 2 veces la velocidad del motor en el menor tiempo posible (una velocidad enseguida de la otra). Es peligroso aplicar energía a un motor de corriente directa en serie sin ninguna carga, ya que el motor puede acelerar y destruirse a sí mismo, por esta razón se usan *detectores de velocidad que previenen la velocidad excesiva del motor y posible destrucción*.

Desconecte la fuente de alimentación. Reduzca el voltaje de la fuente de alimentación a 0V.

Acople el motor al freno y ajuste la perilla de control del electrodinamómetro a su posición media para proporcionar un valor de carga al arranque.

Aplique carga al motor considerando los valores de τ de acuerdo con la tabla e. Para los valores de carga considerados verifique $E = 120V$.

Desconecte la fuente de alimentación y verifique la posición media del control del electrodinamómetro para un arranque futuro.

Calcule las cantidades indicadas en la tabla f.

Tabla e Valores medidos. Motor de corriente directa con **excitación serie**. $E = 120V$.

τ	I	n
lb _r plg	A	rpm
0		
1.5		
.		
12		

Tabla f Valores calculados. Eficiencia del motor de corriente directa con **excitación serie**.
 $E = 120V$.

τ	$P_{el\acute{e}ctrica}$	$P_{mec\acute{a}nica}$	η	% reg velocidad
lb _r plg	W	W	%	
0				
1.5				
.				
12				

Verifique que la dirección de rotación se invierte si las conexiones de la armadura o devanado de campo serie se invierten.

Objetivo 3 MS Grafique la característica mecánica: par como función de la velocidad (figura k) y grafique las características electromecánicas: curvas de par (figura l), de velocidad (figura m), de la potencia de salida (figura n) y de la eficiencia como función de la corriente absorbida (figura o).

Insertar figura

Figura **k** Par como función de la velocidad (τ vs n).
Motor de corriente directa con **excitación serie**.

Insertar figura

Figura **l** Par como función de la corriente absorbida (τ vs I).
Motor de corriente directa con **excitación serie**.

Insertar figura

Figura **m** Velocidad como función de la corriente absorbida (n vs I).
Motor de corriente directa con **excitación serie**.

Insertar figura

Figura **n** Potencia de salida como función de la corriente absorbida (P_m vs I).
Motor de corriente directa con **excitación serie**.

Insertar figura

Figura **o** Eficiencia como función de la corriente absorbida (η vs I).
Motor de corriente directa con **excitación serie**.

Proponga usando los valores medidos y calculados las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio del motor de corriente directa con excitación serie (tabla **g**).

Tabla **g** Propuesta. Cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio del motor de corriente directa con **excitación serie**.

Voltaje promedio	Corriente promedio	Potencia promedio	Velocidad
E (V)	I (A)	P (W)	n (rpm)

Lleve a cabo la metodología **✓** para el motor de corriente directa con **excitación serie**.

Tabla **h** Valores medidos. Motor de corriente directa con **excitación serie**. $I = 3A$.

E	τ
V	lb _{rplg}

$$\tau_{\text{máximo excitación serie}} =$$

$$R_{\text{equivalente excitación serie}} =$$

$$I_{\text{arranque excitación serie}} =$$

Objetivo 4 MS Use la tabla **iii** aplicada al motor serie y calcule las pérdidas y la eficiencia del motor con **excitación serie**, muestre los resultados en la tabla **j**.

Tabla **j** Pérdidas y cálculo de la eficiencia usando la tabla **iii**. Motor de corriente directa con **excitación serie**.

Insertar tabla

Muestre en la figura **p** la comparación entre las eficiencias calculadas con el experimento y con el modelo matemático de la tabla **iii** aplicada al motor de corriente directa con **excitación serie**.

Insertar grafica

Figura **p** Comparación entre las eficiencias (experimento y modelo matemático).
Motor de corriente directa con **excitación serie**.

Motor de corriente directa con excitación compuesta paralelo largo acumulativo

Objetivo 1 MC Conecte la máquina de corriente directa para operar el motor de corriente directa con excitación compuesta paralelo largo.

Ajuste el reóstato de campo a la resistencia mínima.

Para verificar si el motor de corriente directa está en flujo totalizado o diferencial se ejecutará la siguiente prueba:

Desacople el motor del freno.

Energice el motor y ajuste el voltaje $E = 40V$. Mida la velocidad n_1 .

Mientras el motor esté girando cortocircuite el devanado de excitación en serie y mida la velocidad n_2 .

A partir de la comparación entre las dos velocidades se deduce que:

- a) Si $n_2 < n_1$ tenemos un motor con flujo diferencial. De echo, después de que el campo en serie ha sido removido la velocidad se ha reducido debido a que el flujo útil se ha incrementado; esto significa que el campo en serie estaba opuesto al campo en derivación.
- b) Si $n_2 > n_1$ tenemos obviamente un motor con flujo totalizado.

Observación:

9 En algunos casos el campo magnético que produce el devanado serie es más intenso que el campo magnético que produce el devanado derivado (aún en vacío), esto implica que si el motor opera con flujo diferencial el rotor de la máquina se detiene y acelera sobre la otra dirección, lo anterior es sumamente peligroso ya que la corriente tiende a la corriente de arranque cuando $n \rightarrow 0$.

Si al ejecutar la prueba se presenta la **observación 8**, n_2 no puede medirse. Obviamente la máquina está en flujo diferencial. Si el cortocircuito se remueve el motor recupera su condición inicial (el rotor del motor para y gira sobre la dirección inicial).

Para que el motor de corriente directa opere con flujo totalizado invierta las terminales que van conectadas al devanado serie.

Desconecte la fuente de alimentación. Reduzca el voltaje de la fuente de alimentación a 0V.

Objetivo 2 MC El experimento procede empleando el motor de corriente directa con flujo totalizado. Acople el motor al freno.

Verifique $E = 120V$ y ajuste el reóstato de campo en derivación para que $n = 1800\text{rpm}$ en condición de vacío.

Aplique carga al motor considerando los valores de τ de acuerdo con la tabla i. Para los valores de carga considerados verifique $E = 120V$ (no toque el reóstato de campo durante la prueba).

Tire la carga y desconecte la fuente de alimentación. Coloque el reóstato de campo en resistencia mínima y verifique carga cero ($I_{\text{freno}} = 0A$), para un arranque futuro.

Calcule las cantidades indicadas en la tabla j.

Tabla i Valores medidos. Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**. $E = 120V$.

τ	I	n
lb _r plg	A	rpm
0		
1.5		
.		
12		

Tabla j Valores calculados. Eficiencia del motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**. $E = 120V$.

τ	$P_{\text{eléctrica}}$	$P_{\text{mecánica}}$	η	% reg velocidad
lb _r plg	W	W	%	
0				
1.5				
.				
12				

Objetivo 3 MC Grafique la característica mecánica: par como función de la velocidad (figura q) y grafique las características electromecánicas: curvas de par (figura r), de velocidad (figura s), de la potencia de salida (figura t) y de la eficiencia como función de la corriente absorbida (figura u).

Insertar figura

Figura q Par como función de la velocidad (τ vs n).

Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.

Insertar figura

Figura **r** Par como función de la corriente absorbida (τ vs I).
Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.

Insertar figura

Figura **s** Velocidad como función de la corriente absorbida (n vs I).
Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.

Insertar figura

Figura **t** Potencia de salida como función de la corriente absorbida (P_m vs I).
Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.

Insertar figura

Figura **u** Eficiencia como función de la corriente absorbida (η vs I).
Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.

Proponga usando los valores medidos y calculados las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio del motor de corriente directa con excitación serie (tabla **k**).

Tabla **k** Propuesta. Cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio del motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.

Voltaje promedio	Corriente promedio	Potencia promedio	Velocidad
E (V)	I (A)	P (W)	n (rpm)

Observación:

10 El experimento propuesto permite proponer un dato de placa que no es el propuesto por el fabricante ya que la velocidad para la potencia mecánica especificada no es 1800rpm.

Lleve a cabo la metodología ✓ para el motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.

Tabla **l** Valores medidos. Motor de corriente directa con **excitación scompuesta paralelo largo acumulativo**. $I = 3A$.

E	τ
V	lb _r plg

$\tau_{\text{máximo excitación compuesta paralelo largo diferencial}} =$

$R_{\text{equivalente excitación compuesta paralelo largo diferencial}} =$

$I_{\text{arranque excitación compuesta paralelo largo diferencial}} =$

Objetivo 4 MC Use la tabla **iii** aplicada al motor de corriente directa con excitación compuesta paralelo largo acumulativo y calcule las pérdidas y la eficiencia del motor con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**, muestre los resultados en la tabla **n**.

Tabla **n** Pérdidas y cálculo de la eficiencia usando la tabla **iii**. Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.
Insertar tabla

Muestre en la figura **v** la comparación entre las eficiencias calculadas con el experimento y con el modelo matemático de la tabla **iii** aplicada al motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.

Insertar grafica

Figura **v** Comparación entre las eficiencias (experimento y modelo matemático).
Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.

Metodología ✓✓:

P3 ¿Cuántas veces es mayor la corriente de arranque comparada con corriente normal a plena carga para cada motor de corriente directa? Muestre los resultados en la tabla **o**.

Tabla **o** # de veces en que la corriente de arranque es mayor que la corriente normal a plena carga para cada motor de corriente directa.

Excitación derivada			Excitación serie			Excitación compuesta paralelo largo acumulativo		
I	Iarranque	# veces	I	Iarranque	# veces	I	Iarranque	# veces
A	A		A	A		A	A	

Compare los motores de corriente directa en cuanto τ_{arranque} y $R_{\text{equivalente}}$. Muestre los resultados en la tabla **p**.

Tabla **p** Comparación de los motores de corriente directa en cuanto τ_{arranque} y $R_{\text{equivalente}}$.

Excitación derivada		Excitación serie		Excitación compuesta paralelo largo acumulativo	
τ_{arranque} lb _r plg	$R_{\text{equivalente}}$ (Ω)	τ_{arranque} lb _r plg	$R_{\text{equivalente}}$ (Ω)	τ_{arranque} lb _r plg	$R_{\text{equivalente}}$ (Ω)

P4 ¿El dato de placa es el mismo para las motores corriente directa?

Grafique las características mecánicas de los motores de corriente directa, use solo una gráfica (figura **w**).

Insertar figura

Figura **w** Par como función de la velocidad (τ vs n). Motores de corriente directa.

Sugerencias didácticas

Construir el **complemento: Reto 3** para analizar el motor de corriente directa es importante porque permite analizar el modelo matemático propuesto por el profesor y aplicarlo satisfactoriamente a la práctica de laboratorio. La herramienta computacional ofrece resultados al instante (datos, cálculos y gráficas), permitiendo discutir con el alumno para que se apodere del conocimiento.

Reporte del equipo:

Ver la rúbrica para evaluar prácticas de laboratorio.

Referencias:

Diseño del complemento: Práctica 3

“Tema 2” de la asignatura **“Máquinas Eléctricas”**

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Experimentos de laboratorio No. 24 “El motor de cd en derivación”, 25 “El motor de cd en serie” y 26 “El motor de cd compuesto”:

Experimentos base para el diseño del complemento: Práctica 3

EXPERIMENTOS CON EQUIPO ELÉCTRICO

Theodore Wildi, Michael J. De Vito

Editorial Limusa, México. 1975

Lab-Volt, Sistemas Educativos

Anexo

Solución de las prácticas de laboratorio

Práctica 1

Principio del funcionamiento del motor de corriente directa.

Discusión de resultados:

Objetivo 1

a)

Rotación: **Horario**

Explique cómo definió el sentido de rotación de la bobina móvil. **Se aplica la regla de la mano derecha para definir la polaridad de la bobina móvil y posteriormente se analiza cómo interactúa el campo magnético que produce la bobina y el campo magnético del imán.**

P1 ¿Al energizar la predicción 1 se cumplió? **Si.**

Tabla a Dirección de las fuerzas sobre cada uno de los lados de la bobina considerando el observador 2.

Lado a superior	
Hacia arriba	Hacia abajo
✓	
Lado a inferior	
Hacia arriba	Hacia abajo
	✓
Lado izquierdo	
Hacia afuera de la página	Hacia adentro de la página
	✓
Lado derecho	
Hacia afuera de la página	Hacia adentro de la página
✓	

Abra el interruptor s e intercambie los cables conectados a la bobina móvil, cierre el interruptor s y observe el efecto en la bobina móvil, **P2** ¿La dirección del movimiento cambió? **Si.**

Intercambie la posición del imán, **P3** ¿La dirección del movimiento cambió? **Si.**

P4 ¿Cuál es su predicción si el circuito se energiza con corriente alterna (ca)? **Los experimentos muestran que si la dirección de la corriente cambia, entonces se invierte la rotación de la bobina móvil. Considerando que $f = 60\text{Hz}$, habrá 60 inversiones cada segundo lo que implica que la bobina móvil no oscila. Si la frecuencia tiende a 0 es posible observar inversiones en el sentido de rotación de la bobina móvil.**

Objetivo 2

b)

P5 ¿Por qué el ángulo de giro de la bobina móvil está limitado a 90° ? En la figura b el ángulo que forma el plano de la bobina con respecto al campo magnético es 0° lo que implica que el par sea máximo. Si el ángulo que forma el plano de la bobina con respecto al campo magnético es 90° el par es $0\text{lb}_r\text{plg}$. Si el ángulo es mayor que 90° el par es negativo por lo que la bobina móvil gira en sentido antihorario con respecto al observador 1, si el ángulo es menor que 90° el par es positivo por lo que la bobina móvil gira en sentido horario con respecto al observador 1. Como se puede ver, la bobina móvil oscila durante un periodo de tiempo hasta que se estabiliza.

P6 ¿Al energizar el sistema, cuál es la dirección del par generado? Hacia el observador 3.

Objetivo 3

c)

De acuerdo con la figura b, **P7** ¿Si el prototipo se energiza (9Vcd) la armadura gira? No. El ángulo que forma el plano de la bobina con respecto al campo magnético es 90° por lo que el par es $0\text{lb}_r\text{plg}$.

P8 ¿Cómo podría eliminarse la función trigonométrica de la ecuación 11 para que el par siempre sea el máximo? Si las piezas polares son cilíndricas el ángulo que forma el plano de la bobina con respecto al campo magnético es 0° lo que hace que el par sea máximo.

Cambie la posición de la bobina y energice (9Vcd), **P9** ¿Por qué la dirección del par no cambia? La bobina que transporta la corriente experimenta fuerzas en presencia del campo magnético. Considere la figura 1, cuando la corriente fluye por la bobina en sentido de las flechas el imán ejerce una fuerza hacia la izquierda sobre el segmento de cables situados cerca del polo norte magnético y una fuerza hacia la derecha sobre el segmento de cables situados cerca del polo sur y esto hace que la armadura gire. Después de cada media vuelta el conmutador invierte el sentido de la corriente y debido a esto las fuerzas sobre la bobina cambian de sentido de tal manera que el giro se completa. El ciclo se repite una y otra vez proporcionando un movimiento continuo.

P10 ¿Cuál es el ángulo de giro para la conmutación sea óptima? 90° .

P11 ¿Qué sucede si la conmutación no es óptima? La armadura acelera o frena. Se establecen diferencias de potencial en las delgas del colector que tiene como consecuencia un chisporroteo.

Práctica 2

Análisis del generador de corriente directa y cálculo de su eficiencia.

Discusión de resultados:

Objetivo 2

b)

Generador de corriente directa con excitación independiente.

Tabla a Valores medidos. Ajuste correcto de la corriente de campo I_f . $E_a = 120V$.

I_f (A)	I_A (A)
0.34	1

Tabla b Valores medidos. **Característica de carga** (E_a vs I_A).
Generador de corriente directa con **excitación independiente**.

R_L (Ω)	E_a (V)	I_A (A)
∞	132	0
600	128.6	0.3
300	125.8	0.38
200	123.5	0.6
150	121.2	0.8
120	118.6	1
100	116.2	1.15
85	112.5	1.38
75	110.8	1.45

Tabla c Valores calculados. **Característica de carga**. Potencia P y % de regulación de voltaje para cada valor de carga.

Generador de corriente directa con **excitación independiente**.

R_L (Ω)	P (W)	% de regulación de voltaje
∞	0	0
600	38.58	2.575
300	47.804	4.696
200	74.1	6.439
150	96.96	8.181
120	118.6	10.151
100	133.63	11.969
85	155.25	14.772
75	160.66	16.060

Con la resistencia de carga ajustada a una corriente de salida I_A de 1.5A, conecte y desconecte el cable de conexión de la terminal 6 del generador de c, **P1** ¿Nota que el motor propulsor funciona con mayor dificultad cuando el generador entrega potencia a la carga? **Si consideramos una condición de sobrecarga del 50% y alguna terminal del devanado derivado se desconecta el rotor**

del generador tiende a frenarse dado que la tensión inducida tiende a cero. En esta condición el motor propulsor funciona con mayor dificultad ya que el generador esta entregando potencia a la carga.

$$I_f = 0.55A$$

Tabla d Valores medidos. **Característica de regulación** (E_a vs I_A). $E_a = 120V$.
Generador de corriente directa con **excitación independiente**.

$R_L (\Omega)$	$I_f (V)$	$I_A (A)$
∞	0.28	0
600	0.3	0.2
300	0.31	0.4
200	0.32	0.6
150	0.34	0.8
120	0.36	1
100	0.37	1.2
85	0.39	1.48
75	0.41	1.56

Tabla e Valores calculados. **Característica de regulación**. Potencia P y % de regulación de voltaje para cada valor de carga.

Generador de corriente directa con **excitación independiente**.

$R_L (\Omega)$	P (W)	% de regulación de voltaje
∞	0	0
600	24	0
300	48	0
200	72	0
150	96	0
120	120	0
100	144	0
85	177.6	0
75	187.2	0

Generador de corriente directa con autoexcitación derivada.

Tabla x Valores medidos. Ajuste correcto de la corriente de campo I_f para que $E_a = 120V$.

$I_f (A)$	$I_a (A)$
0.34	1

Tabla **y** Valores medidos. **Característica de carga** (E_a vs I_a).
Generador de corriente directa con **autoexcitación derivada**.

$R_L (\Omega)$	$E_a (V)$	$I_a (A)$
∞	147.4	0
600	143	0.23
300	137.6	0.461
200	132.8	0.66
150	126.9	0.86
120	120.7	1
100	112.1	1.2
85	99.7	1.24
75	98.5	1.3

Tabla **z** Valores calculados. **Característica de carga**. Potencia P y % de regulación de voltaje para cada valor de carga.

Generador de corriente directa con **autoexcitación derivada**.

$R_L (\Omega)$	$P (W)$	% de regulación de voltaje
∞	0	-22.120
600	32.890	-18.475
300	63.433	-14.001
200	87.648	-10.024
150	109.134	-5.136
120	120.700	0
100	125.552	7.125
85	123.628	17.398
75	128.050	18.392

Generador de corriente directa con excitación compuesta.

Tabla **f** Valores medidos. **Característica de carga** (E vs I).
Generador de corriente directa con excitación compuesta **paralelo corto acumulativo**.

$R_L (\Omega)$	$E (V)$	$I (A)$
∞	120	0
600	122	0.2
300	128	0.42
200	130	0.62
150	130	0.85
120	130	1.05
100	130	1.25
85	105	1.28
75	100	1.32

Tabla g Valores calculados. **Característica de carga.** Potencia P y % de regulación de voltaje para cada valor de carga.

Generador de corriente directa con excitación compuesta **paralelo corto acumulativo.**

R_L (Ω)	P (W)	% de regulación de voltaje
∞	0	0
600	24.4	-1.666
300	53.76	-6.666
200	80.6	-8.333
150	110.5	-8.333
120	136.5	-8.333
100	162.5	-8.333
85	134.4	12.5
75	132	16.666

Tabla h Valores medidos. **Característica de carga** (E vs I).

Generador de corriente directa con excitación compuesta **paralelo largo diferencial.**

R_L (Ω)	E (V)	I (A)
∞	120	0
600	100	0.2
300	55	0.2
200	40	0.15
150	15	0.1
120	12	0.1
100	10	0.1
85	6	0.09
75	5	0.08

Tabla i Valores calculados. **Característica de carga.** Potencia P y % de regulación de voltaje para cada valor de carga.

Generador de corriente directa con excitación compuesta **paralelo largo diferencial.**

R_L (Ω)	P (W)	% de regulación de voltaje
∞	0	0
600	20	16.666
300	11	54.166
200	6	66.666
150	1.5	87.5
120	1.2	90
100	1	91.666
85	0.54	95
75	0.4	95.833

Generador de corriente directa con excitación serie.

$$E = 3V$$

Tabla **j** Valores medidos. **Característica de carga** (E vs I_A).
Generador de corriente directa con **excitación serie**.

$R_L (\Omega)$	E (V)	I_A (A)
∞	3	0
40	12	0.3
37.5	13	0.35
35.3	20	0.55
33.3	23	0.7
31.5	45	1.4
30	54	1.8
28.5	58	2.05

Tabla **k** Valores calculados. **Característica de carga**. Potencia P y % de regulación de voltaje para cada valor de carga.

Generador de corriente directa con **excitación serie**.

$R_L (\Omega)$	P (W)	% de regulación de voltaje
∞	0	0
40	3.6	-300
37.5	4.55	333.333
35.3	11	-566.666
33.3	16.1	-666.666
31.5	63	-1400
30	97.2	-1700
28.5	118.9	-1833.333

Tabla **l** Valores medidos. Línea de transmisión excitada con una fuente de corriente directa.

$R_L (\Omega)$	E (V)	I (A)
∞	120	0
600	115	0.2
240	107	0.45
150	100	0.68
100	93	0.93
80	89	1

Tabla **m** Valores calculados. % de regulación de voltaje de la línea de transmisión excitada con una fuente de corriente directa.

$R_L (\Omega)$	% de regulación de voltaje
∞	0
600	4.166
240	10.833
150	16.666
100	22.5
80	25.833

Tabla n Valores medidos.
Generador con **excitación serie** como regulador de tensión.

$R_L (\Omega)$	E (V)	I_A (A)
∞	120	0
600	118	0.2
240	118	0.48
150	117	0.78
100	113	1.15
80	110	1.4

Tabla o Valores calculados. % de regulación de voltaje de la línea de transmisión. Generador con **excitación serie** como regulador de tensión.

R_L (o)	% de regulación de voltaje
∞	0
600	1.666
240	1.666
150	2.5
100	5.833
80	8.333333333

Objetivo 3

c)

Generador de corriente directa con excitación independiente.

Tabla p Eficiencia del generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de carga.

Resistencia del devanado de los polos de conmutación				Resistencia del devanado de armadura				factor ₁	
Rw				Ra				0.2	
Ω				Ω					
0				9.082				factor ₂	
								0.06	
Resistencia del devanado de excitación derivada				dato de placa					
Re				P _{nominal}	E	I	n	factor ₃	
Ω				W	V	A	rpm	0.01	
236.57				120	120	1	1800		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I _A	0	0.3	0.38	0.6	0.8	1	1.15	1.38	1.45
E ₂	132	128.6	125.8	123.5	121.2	118.6	116.2	112.5	110.8
P = E _a I _A	0	38.58	47.804	74.1	96.96	118.6	133.63	155.25	160.66
I _f	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
Pe = Re I _f ²	27.347492	27.347492	27.347492	27.347492	27.347492	27.347492	27.347492	27.347492	27.347492
Po = factor ₁ P _{nominal}	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Pw = Rw I _A ²	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pa = Ra I _A ²	0	0.81738	1.3114408	3.26952	5.81248	9.082	12.010945	17.2957608	19.094905
Pb = factor ₂ I _A ²	0	0.0054	0.008664	0.0216	0.0384	0.06	0.07935	0.114264	0.12615
Pad = factor ₃ * P	0	0.3858	0.47804	0.741	0.9696	1.186	1.3363	1.5525	1.6066
Pd	51.347492	52.556072	53.1456368	55.379612	58.167972	61.675492	64.774087	70.3100168	72.175147
Pin=P+Pd	51.347492	91.136072	100.9496368	129.479612	155.127972	180.275492	198.404087	225.5600168	232.835147
eficiencia	0	42.33230504	47.35430608	57.22908716	62.50323443	65.78819932	67.3524432	68.8286879	69.00160997

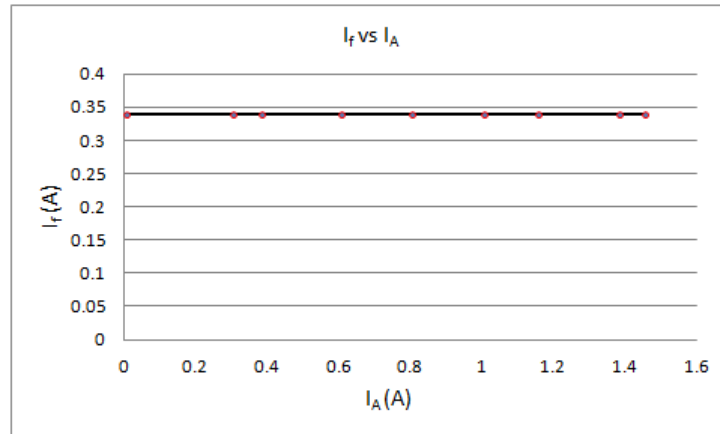


Figura u I_f vs I_A . Generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de carga.

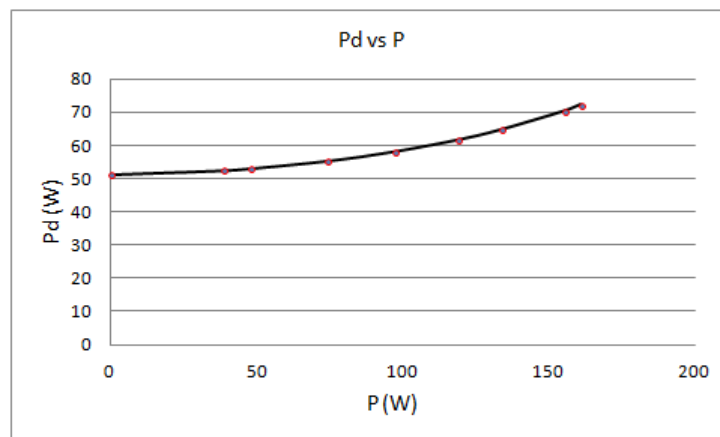


Figura v P_d vs P . Generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de carga.

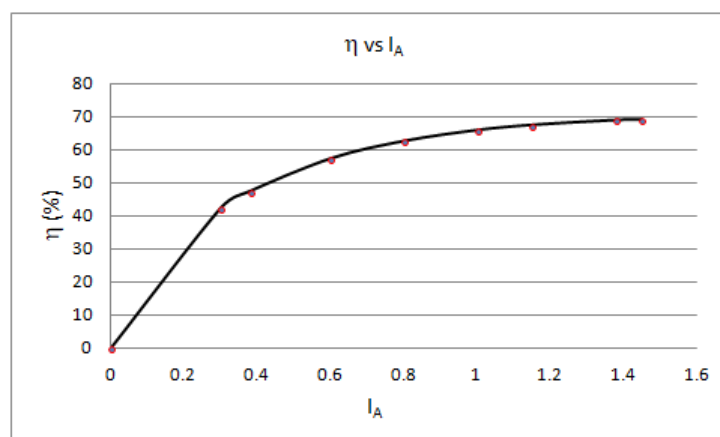


Figura w η vs I_A . Generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de carga.

Tabla q Eficiencia del generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de regulación.

Resistencia del devanado de los polos de conmutación				Resistencia del devanado de armadura				factor ₁	
Rw				Ra				0.2	
Ω				Ω					
0				9.082				factor ₂	
								0.06	
Resistencia del devanado de excitación derivada				dato de placa					
Re				P _{nominal}	E	I	n	factor ₃	
Ω				W	V	A	rpm	0.01	
236.57				120	120	1	1800		
I _A	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.48	1.56
E ₂	120	120	120	120	120	120	120	120	120
P = E _a I _A	0	24	48	72	96	120	144	177.6	187.2
I _f	0.28	0.3	0.31	0.32	0.34	0.36	0.37	0.39	0.41
Pe = Re I _f ²	18.547088	21.2913	22.734377	24.224768	27.347492	30.659472	32.386433	35.982297	39.767417
Po = factor ₁ P _{nominal}	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Pw = Rw I _A ²	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pa = Ra I _A ²	0	0.36328	1.45312	3.26952	5.81248	9.082	13.07808	19.8932128	22.1019552
Pb = factor ₂ I _A ²	0	0.0024	0.0096	0.0216	0.0384	0.06	0.0864	0.131424	0.146016
Pad = factor ₃ * P	0	0.24	0.48	0.72	0.96	1.2	1.44	1.776	1.872
Pd	42.547088	45.89698	48.677097	52.235888	58.158372	65.001472	70.990913	81.7829338	87.8873882
Pin=P+Pd	42.547088	69.89698	96.677097	124.235888	154.158372	185.001472	214.990913	259.3829338	275.0873882
eficiencia	0	34.33624743	49.6498152	57.95426842	62.27362079	64.86434876	66.97957509	68.47019478	68.05110232

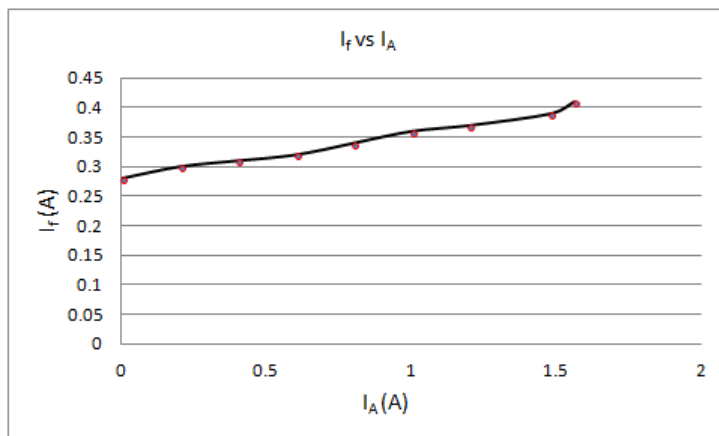


Figura x I_f vs I_A . Generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de regulación.

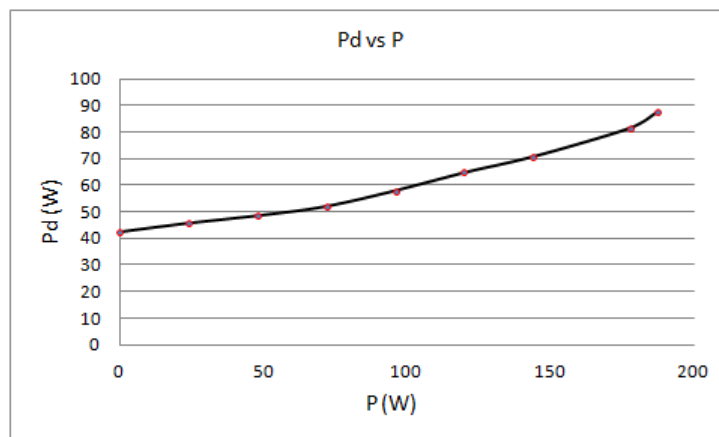


Figura y P_d vs P . Generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de regulación.

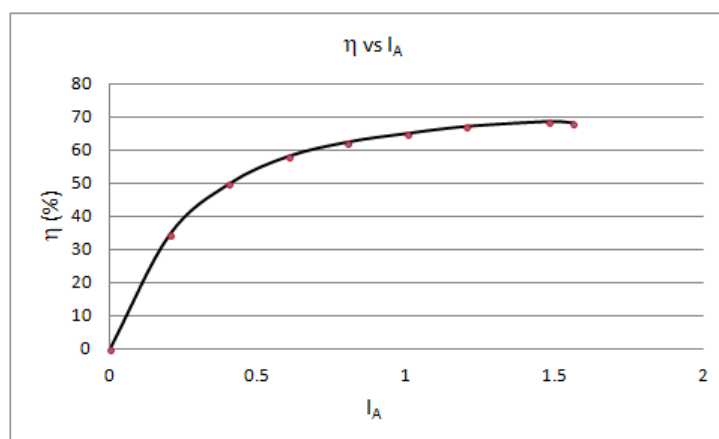


Figura z η vs I_A . Generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de regulación.

Objetivo 4

d)

Generador de corriente directa con excitación independiente.

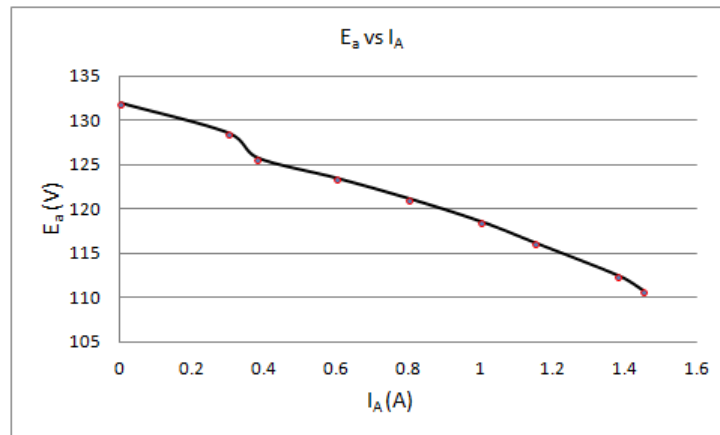


Figura aa E_a vs I_A . Generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de carga.

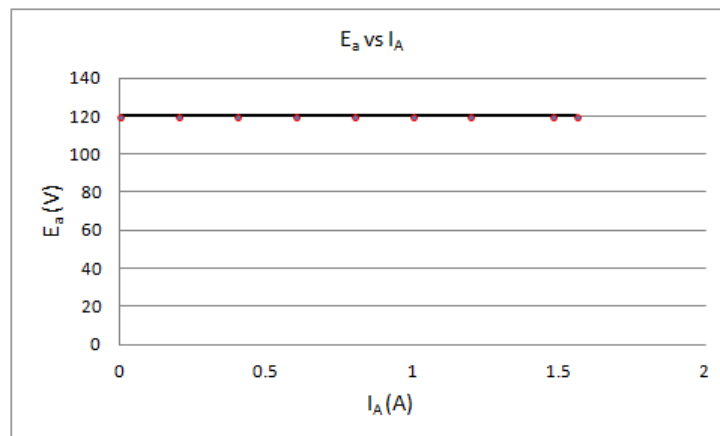


Figura ab E_a vs I_A . Generador de corriente directa con **excitación independiente**.
Característica de regulación.

Generador de corriente directa con autoexcitación derivada.

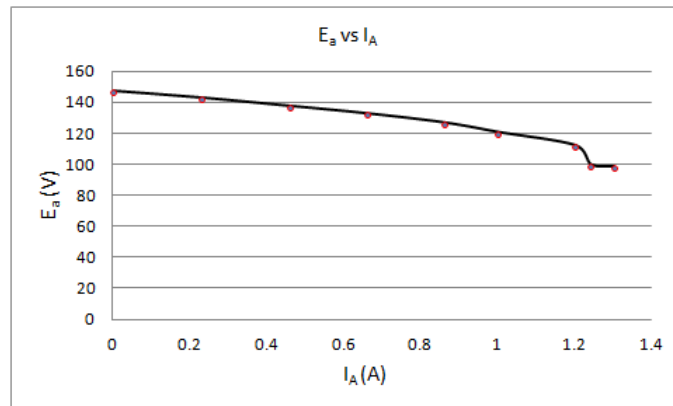


Figura ac E_a vs I_A . Generador de corriente directa con **autoexcitación derivada**.
Característica de carga.

Generador de corriente directa con excitación compuesta.

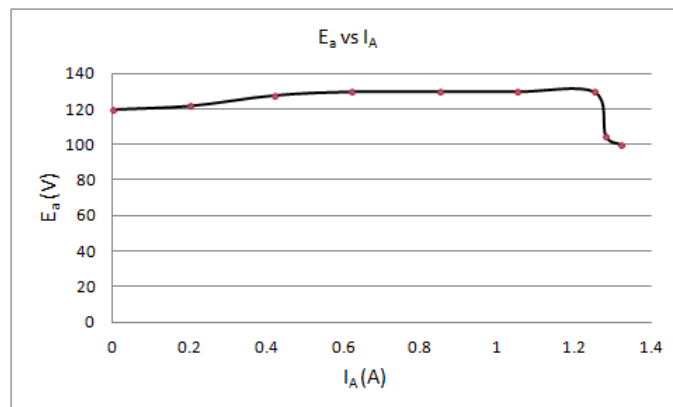


Figura ad E vs I . Generador de corriente directa con **autoexcitación compuesta paralelo corto acumulativo**. **Característica de carga.**

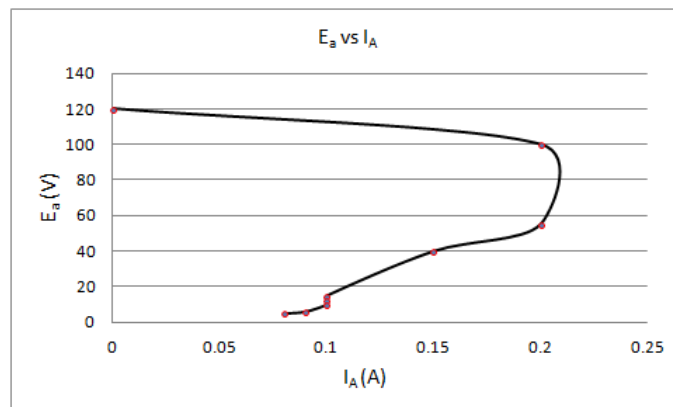


Figura ae E vs I . Generador de corriente directa con **autoexcitación compuesta paralelo largo diferencial**. **Característica de carga.**

Generador de corriente directa con autoexcitación serie.

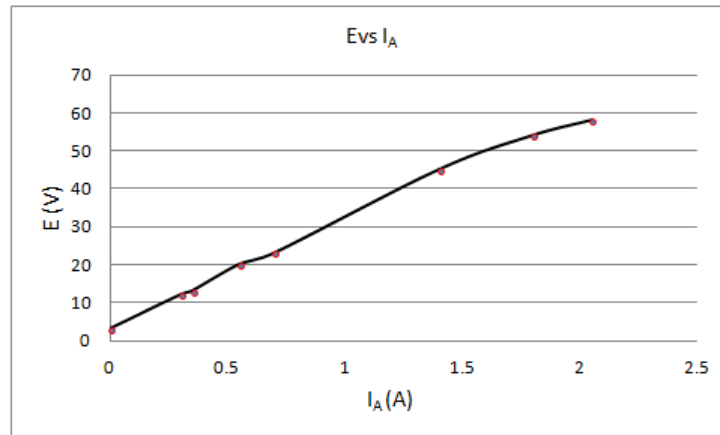


Figura af E vs I_A . Generador de corriente directa con **excitación serie**.
Característica de carga.

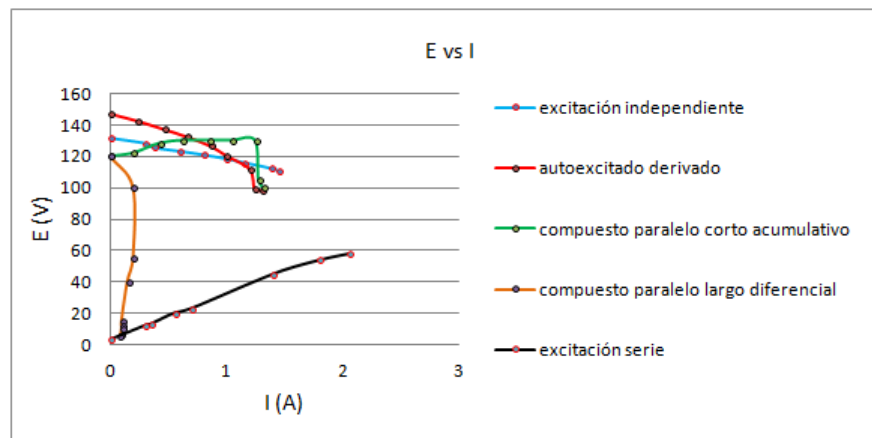


Figura ag Características de carga de los generadores de corriente directa.
Características de carga.

Práctica 3

Determinación del dato nominal del motor de corriente directa, características electromecánicas y cálculo de su eficiencia.

Discusión de resultados:

Motor de corriente directa con excitación derivada

Objetivo 2 MD

$$n_{\text{resistencia mínima}} = 2250 \text{ rpm}$$

$$n_{\text{resistencia máxima}} = 1720 \text{ rpm}$$

Tabla a Valores medidos. Motor de corriente directa con **excitación derivada**. E = 120V.

τ lb _r plg	I A	n rpm
0	0.65	1800
1.5	0.9	1750
3	1.19	1710
4.5	1.45	1670
6	1.75	1650
7.5	2	1630
9	2.3	1585
10.5	2.7	1565
12	2.89	1540

Tabla b Valores calculados. Eficiencia del motor de corriente directa con **excitación derivada**.
E = 120V.

τ lb _r plg	P _{eléctrica} W	P _{mecánica} W	η %	% reg velocidad
0	78	3.202	4.105	0
1.5	108	31.136	28.829	2.777
3	142.8	60.848	42.611	5
4.5	174	89.138	51.228	7.222
6	210	117.427	55.918	8.333
7.5	240	145.005	60.419	9.444
9	276	169.202	61.305	11.944
10.5	324	194.912	60.158	13.055
12	346.8	219.198	63.206	14.444

Objetivo 3 MD

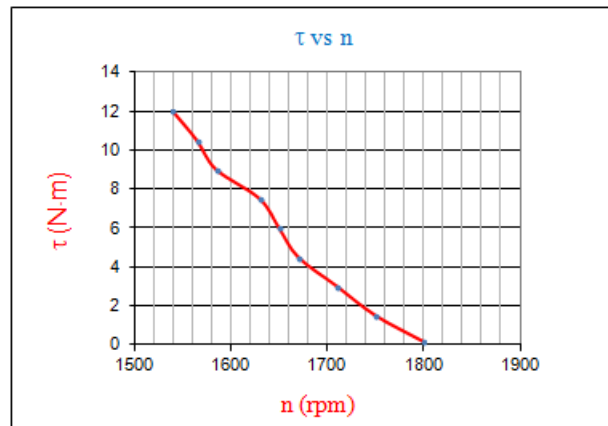


Figura d Par como función de la velocidad (τ vs n).
Motor de corriente directa con **excitación derivada**.

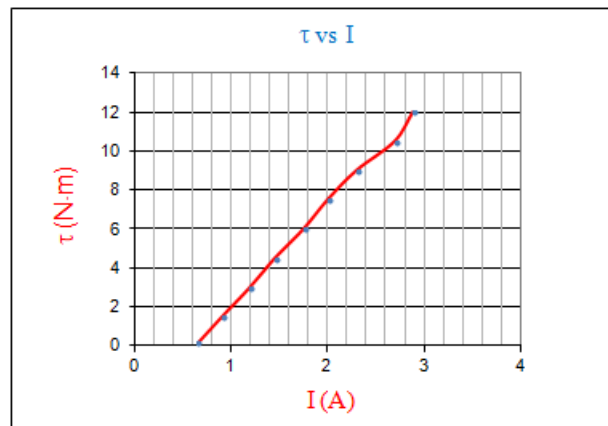


Figura e Par como función de la corriente absorbida (τ vs I).
Motor de corriente directa con **excitación derivada**.

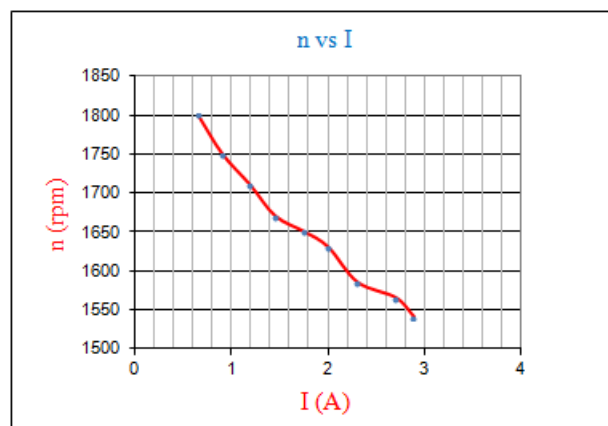


Figura f Velocidad como función de la corriente absorbida (n vs I).
Motor de corriente directa con **excitación derivada**.

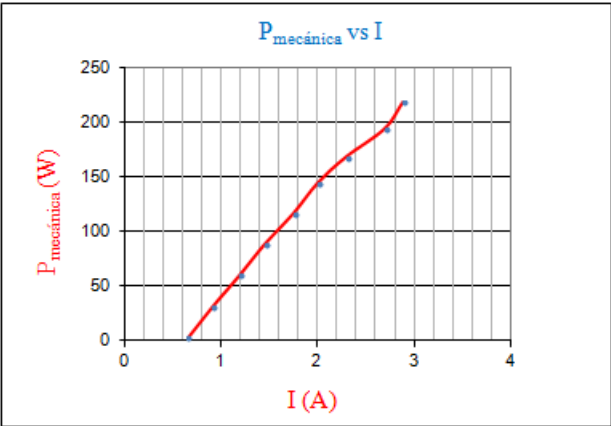


Figura g Potencia de salida como función de la corriente absorbida (P_m vs I).
Motor de corriente directa con **excitación derivada**.

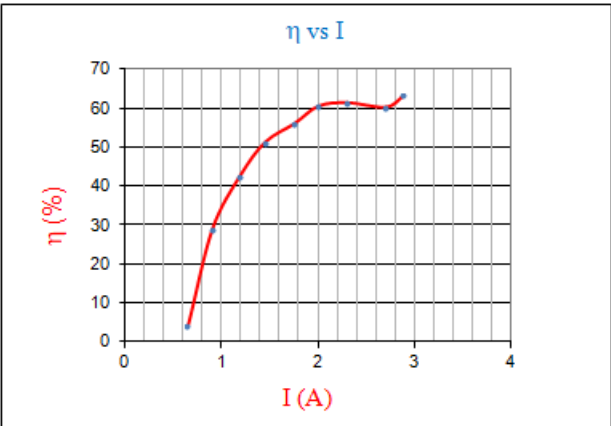


Figura h Eficiencia como función de la corriente absorbida (η vs I).
Motor de corriente directa con **excitación derivada**.

Tabla c Propuesta. Cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio del motor de corriente directa con **excitación derivada**.

Voltaje promedio	Corriente promedio	Potencia promedio	Velocidad
E (V)	I (A)	P (W)	n (rpm)
120	2.3	170	1585

P1 ¿Por qué no coinciden los valores de la tabla c contra los valores de la tabla viii? La corriente de excitación I_e es “constante”, lo que implica que la velocidad disminuya por efecto de la carga.

Para que los datos de placa (propuesto y fabricante) sean comparativamente iguales, **P2** ¿Cómo debería conducirse el experimento? Debe fijarse $n = 1800$ rpm cuando $P = 175$ W, posteriormente se debe tirar la carga e iniciar el experimento con $\tau = 0 \text{ lb}_f\text{-plg}$ y continuar hasta $\tau = 12 \text{ lb}_f\text{-plg}$. Otra forma de conducir el experimento es mantener la velocidad constante ($n = 1800$ rpm) para todos los valores de carga, lo que implica hacer ajustes eventuales en la corriente por el devanado de campo derivado.

Metodología ✓ Motor de corriente directa con **excitación derivada**.

Tabla d Valores medidos. Motor de corriente directa con **excitación derivada**. $I = 3A$.

E	τ
V	lb _r plg
20	2.5

$$\tau_{\text{máximo excitación derivada}} = 15 \text{ lb}_r \text{plg}$$

$$R_{\text{equivalente excitación derivada}} = 6.666 \Omega$$

$$I_{\text{arranque excitación derivada}} = 18A$$

Objetivo 4 MD

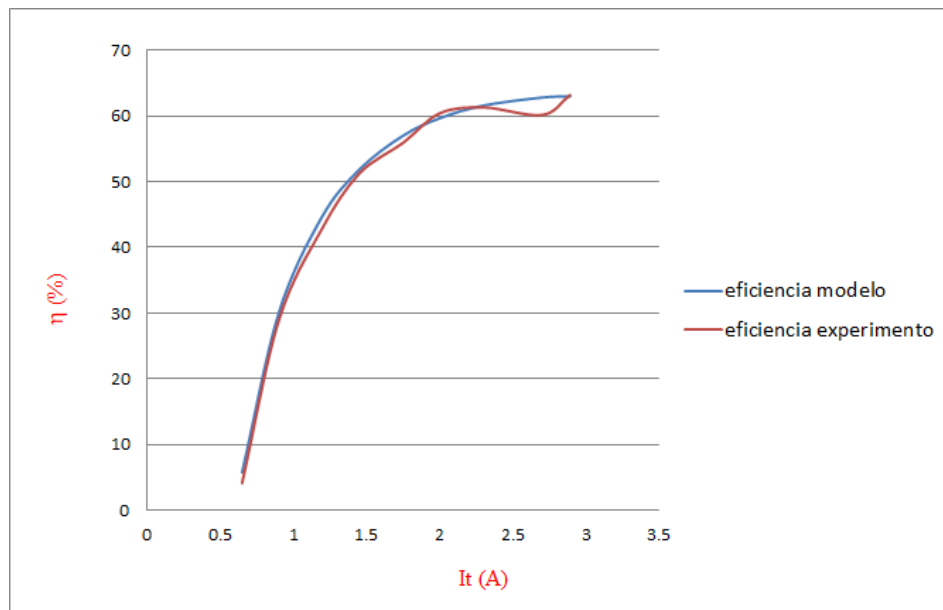


Figura i Comparación entre las eficiencias (experimento y modelo matemático).
Motor de corriente directa con **excitación derivada**.

Tabla f Pérdidas y cálculo de la eficiencia. Motor de corriente directa con **excitación derivada**.

R1 _{T1}	Rw	Resistencia del devanado de los polos de conmutación	0	Ω	Temperatura ambiente, T1	Temperatura de referencia, T
	Ra	Resistencia del devanado de armadura	7.55	Ω	°C	°C
	R _A	Resistencia de arranque	0	Ω	25	234.5
	Rexc	Resistencia del devanado de excitación derivada (conexión serie)	270	Ω		
	P	dato de placa	169.202871	W		

Temperatura de operación de los devanados, T2		25	26	27	28	29	30	31	32	33
R2 _{T2}	Rw	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ra	7.55	7.579094412	7.608188825	7.637283237	7.666377649	7.695472062	7.724566474	7.753660886	7.782755299
	R _A	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rexc	270	271.0404624	272.0809249	273.1213873	274.1618497	275.2023121	276.2427746	277.283237	278.3236994
E		120	120	120	120	120	120	120	120	120
It		0.65	0.9	1.19	1.45	1.75	2	2.3	2.7	2.89
Ie		0.27	0.269	0.268	0.267	0.266	0.265	0.264	0.263	0.262
Rexc + Rreóstat = Req1		444.4444444	446.0966543	447.761194	449.4382022	451.1278195	452.8301887	454.5454545	456.2737643	458.0152672
Rreóstat		174.4444444	175.0561918	175.6802692	176.316815	176.9659698	177.6278765	178.30268	178.9905273	179.6915678
Ia		0.38	0.631	0.922	1.183	1.484	1.735	2.036	2.437	2.628
P = E * It		78	108	142.8	174	210	240	276	324	346.8
PRexc = Rexc * Ie ²		19.683	19.6127589	19.54194035	19.47055058	19.39859584	19.32608237	19.25301642	19.17940422	19.10525202
Preóstat = Rreóstat * Ie ²		12.717	12.6672411	12.61805965	12.56944942	12.52140416	12.47391763	12.42698358	12.38059578	12.33474798
PReq1 = PRexc + Preóstat		32.4	32.28	32.16	32.04	31.92	31.8	31.68	31.56	31.44
PReq1 = Req1 * Ie ²		32.4	32.28	32.16	32.04	31.92	31.8	31.68	31.56	31.44
Po = factor1 * P		39.25506607	39.25506607	39.25506607	39.25506607	39.25506607	39.25506607	39.25506607	39.25506607	39.25506607
Pw = Rw * Ia ²		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pa = Ra * Ia ²		1.09022	3.01769981	6.467599589	10.68829388	16.88332618	23.16510239	32.02061451	46.04875164	53.75069667
Pb = factor2 * Ia ²		0.008664	0.02388966	0.05100504	0.08396934	0.13213536	0.1806135	0.24871776	0.35633814	0.41438304
Pad = factor3 * P		0.78	1.08	1.428	1.74	2.1	2.4	2.76	3.24	3.468
PR _A = R _A * Ia ²		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pd		73.53395007	75.65665554	79.3616707	83.80732929	90.29052761	96.80078196	105.9643983	120.4601559	128.3281458
P _{mecánica} = P - Pd		4.466049928	32.34334446	63.4383293	90.19267071	119.7094724	143.199218	170.0356017	203.5398441	218.4718542
η		5.725705036	29.94754116	44.42460035	51.83486822	57.00451066	59.66634085	61.60710205	62.82093955	62.99649776
τ		0.209177572	1.558155961	3.127661	4.553221985	6.116579442	7.406569293	9.044293433	10.96476035	11.96021046

Motor de corriente directa con excitación serie

Objetivo 2 MS

Tabla e Valores medidos. Motor de corriente directa con **excitación serie**. $E = 120V$.

τ	I	n
lb _r plg	A	rpm
0	1	4800
1.5	1.12	3420
3	1.49	3000
4.5	1.8	2560
6	2.12	2200
7.5	2.38	2000
9	2.62	1830
10.5	2.75	1750
12	3.1	1620

Tabla f Valores calculados. Eficiencia del motor de corriente directa con **excitación serie**.
 $E = 120V$.

τ	$P_{el\acute{e}ctrica}$	$P_{mec\acute{a}nica}$	η	% reg velocidad
lb _r plg	W	W	%	
0	120	8.540	7.116	-166.666
1.5	134.4	60.848	45.274	-90
3	178.8	106.752	59.705	-66.666
4.5	216	136.643	63.260	-42.222
6	254.4	156.570	61.545	-22.222
7.5	285.6	177.921	62.297	-11.111
9	314.4	195.357	62.136	-1.666
10.5	330	217.953	66.046	2.777
12	372	230.585	61.985	10

Objetivo 3 MS

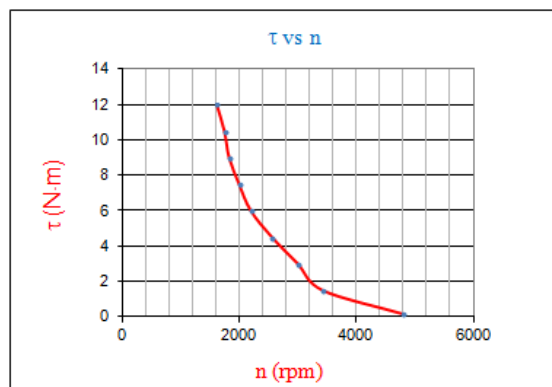


Figura k Par como función de la velocidad (τ vs n).
Motor de corriente directa con **excitación serie**.

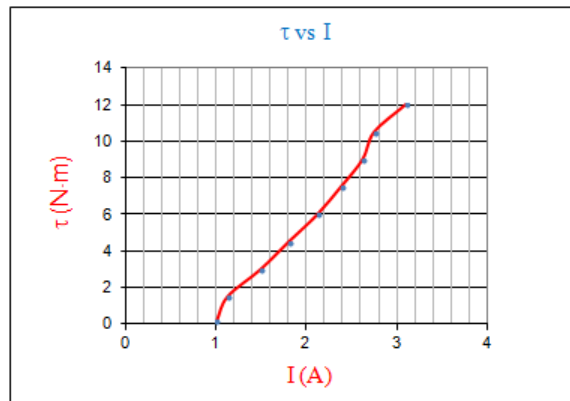


Figura 1 Par como función de la corriente absorbida (τ vs I).
Motor de corriente directa con **excitación serie**.

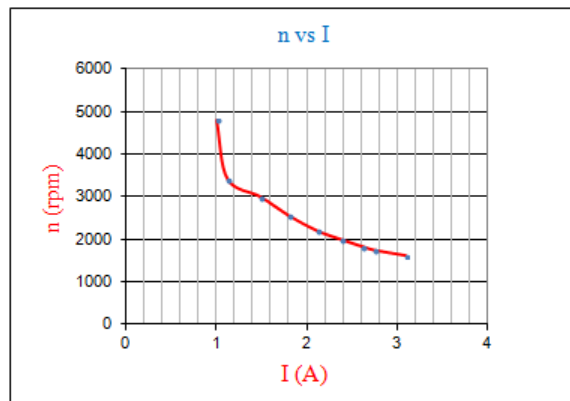


Figura m Velocidad como función de la corriente absorbida (n vs I).
Motor de corriente directa con **excitación serie**.

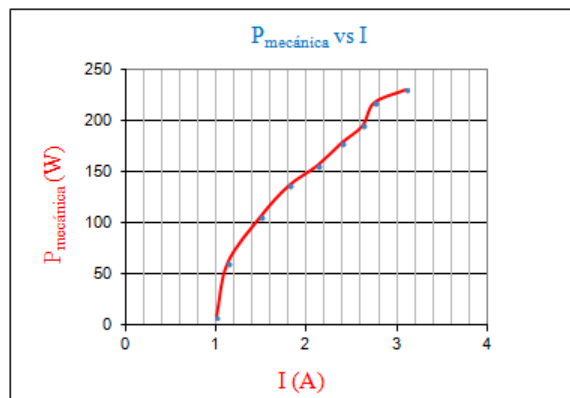


Figura n Potencia de salida como función de la corriente absorbida (P_m vs I).
Motor de corriente directa con **excitación serie**.

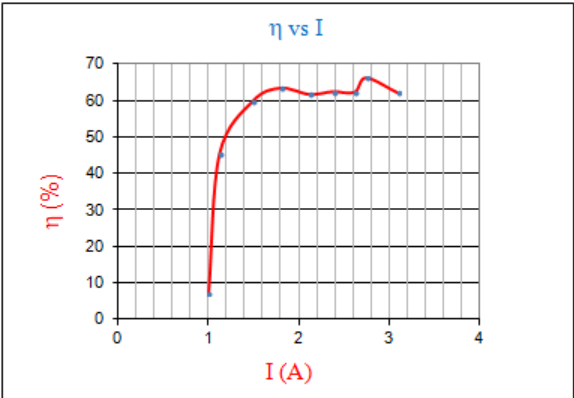


Figura o Eficiencia como función de la corriente absorbida (η vs I).
Motor de corriente directa con **excitación serie**.

Tabla g Propuesta. Cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio del motor de corriente directa con **excitación serie**.

Voltaje promedio	Corriente promedio	Potencia promedio	Velocidad
E (V)	I (A)	P (W)	n (rpm)
120	2.62	195	1830

Metodología ✓ Motor de corriente directa con **excitación serie**.

Tabla h Valores medidos. Motor de corriente directa con **excitación serie**. $I = 3 \text{ A}$.

E	τ
V	lb _r plg
30	13.4

$$\tau_{\text{máximo excitación serie}} = 53.6 \text{ lb}_r\text{plg}$$

$$R_{\text{equivalente excitación serie}} = 10 \Omega$$

$$I_{\text{arranque excitación serie}} = 12 \text{ A}$$

Objetivo 4 MS

Tabla j Pérdidas y cálculo de la eficiencia. Motor de corriente directa con **excitación serie**.

R1 _{T1}	Rw	Resistencia del devanado de los polos de conmutación	0	Ω	Temperatura ambiente, T1	Temperatura de referencia, T
	Ra	Resistencia del devanado de armadura	7.55	Ω	°C	°C
	Rk	Resistencia del devanado serie	1.79	Ω	25	234.5
	P	dato de placa	217.953225	W		

Temperatura de operación de los devanados, T2		25	26	27	28	29	30	31	32	33
R2 _{T2}	Rw	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ra	7.55	7.579094412	7.608188825	7.637283237	7.666377649	7.695472062	7.724566474	7.753660886	7.782755299
	Rk	1.79	1.796897881	1.803795761	1.810693642	1.817591522	1.824489403	1.831387283	1.838285164	1.845183044
E		120	120	120	120	120	120	120	120	120
It = Ia		1	1.12	1.49	1.8	2.12	2.38	2.62	2.75	3.1
P = E * It		120	134.4	178.8	216	254.4	285.6	314.4	330	372
Po = factor1 * P		50.5651482	50.5651482	50.5651482	50.5651482	50.5651482	50.5651482	50.5651482	50.5651482	50.5651482
Pw = Rw * Ia ²		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pa = Ra * Ia ²		7.55	9.507216031	16.89094001	24.74479769	34.45576771	43.59023195	53.0245141	58.63706045	74.79227842
Pb = factor2 * Ia ²		0.06	0.075264	0.133206	0.1944	0.269664	0.339864	0.411864	0.45375	0.5766
Pad = factor3 * P		1.2	1.344	1.788	2.16	2.544	2.856	3.144	3.3	3.72
Pk = Rk * It ²		1.79	2.254028701	4.004606969	5.866647399	8.168983337	10.33463777	12.57137487	13.90203155	17.73220906
Pd		61.1651482	63.74565693	73.38190118	83.53099329	96.00356324	107.6858819	119.7169012	126.8579902	147.3862357
P _{mecánica} = P - Pd		58.8348518	70.65434307	105.4180988	132.4690067	158.3964368	177.9141181	194.6830988	203.1420098	224.6137643
η		49.02904317	52.57019573	58.95866824	61.32824385	62.2627503	62.29485927	61.92210523	61.55818479	60.38004417
τ		1.033373867	1.741713848	2.962497367	4.36252936	6.069973219	7.499709903	8.968941863	9.786462682	11.68921643

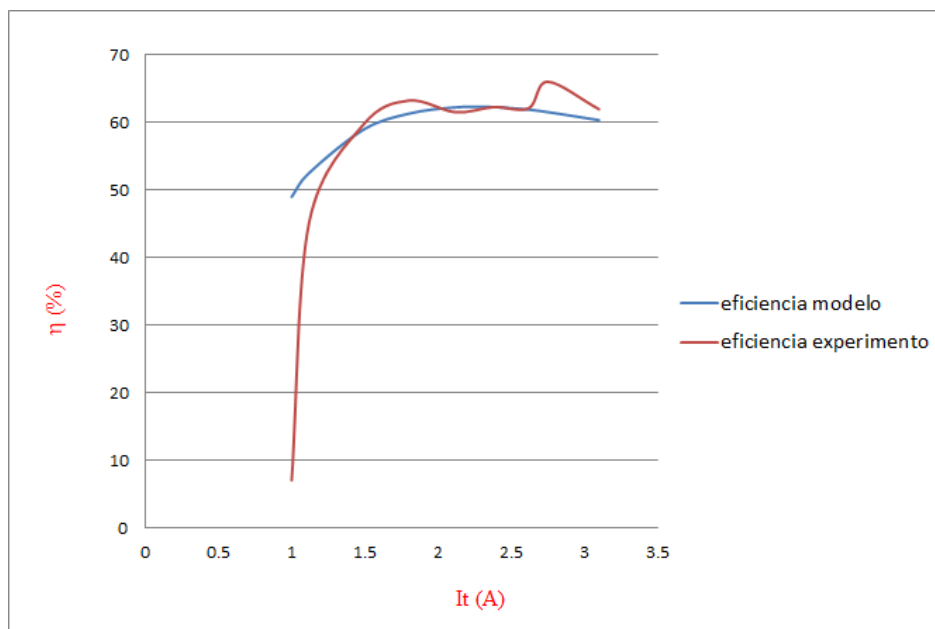


Figura p Comparación entre las eficiencias (experimento y modelo matemático).
Motor de corriente directa con **excitación serie**.

Motor de corriente directa con excitación compuesta paralelo largo acumulativo

Objetivo 2 MC

Tabla i Valores medidos. Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**. $E = 120V$.

τ	I	n
lb _r plg	A	rpm
0	0.8	1800
1.5	0.82	1710
3	1.1	1610
4.5	1.3	1535
6	1.5	1470
7.5	1.7	1420
9	1.79	1360
10.5	2.02	1315
12	2.2	1275

Tabla j Valores calculados. Eficiencia del motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**. $E = 120V$.

τ	$P_{el\acute{e}ctrica}$	$P_{mec\acute{a}nica}$	η	% reg velocidad
lb _r plg	W	W	%	
0	96	3.202	3.336	0
1.5	98.4	30.424	30.919	5
3	132	57.290	43.401	10.555
4.5	156	81.932	52.520	14.722
6	180	104.617	58.120	18.333
7.5	204	126.323	61.923	21.111
9	214.8	145.183	67.590	24.444
10.5	242.4	163.776	67.564	26.944
12	264	181.479	68.742	29.166

Objetivo 3 MC

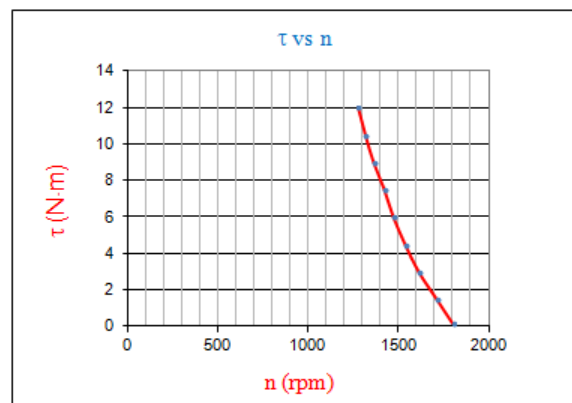


Figura q Par como función de la velocidad (τ vs n).
Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.

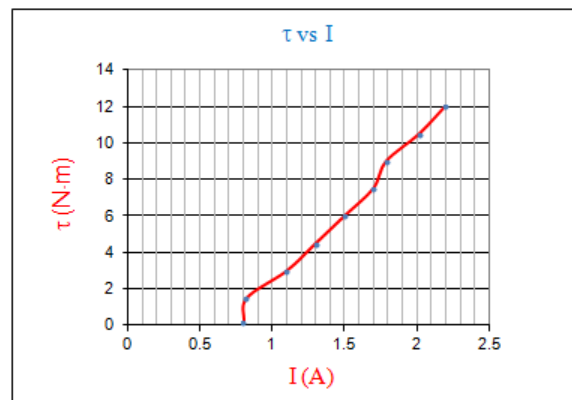


Figura r Par como función de la corriente absorbida (τ vs I).
Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.

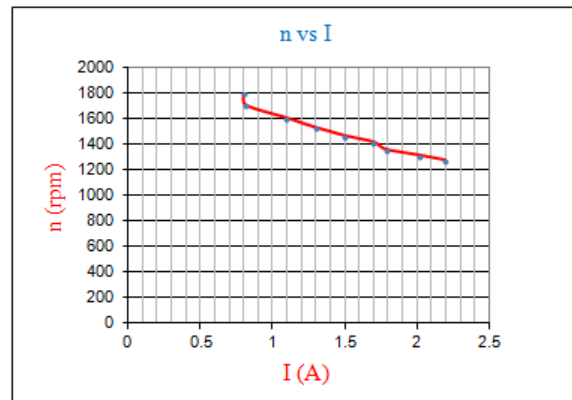


Figura s Velocidad como función de la corriente absorbida (n vs I).
Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.

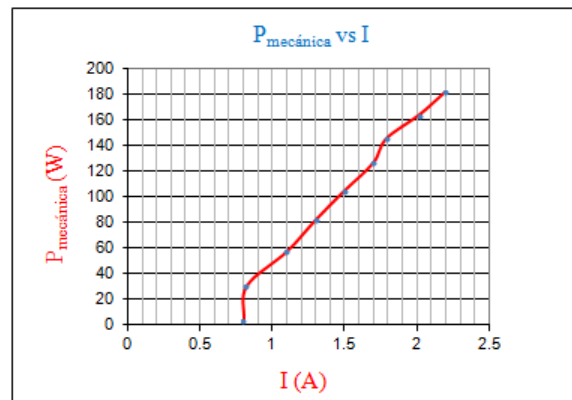


Figura t Potencia de salida como función de la corriente absorbida (P_m vs I).
Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.

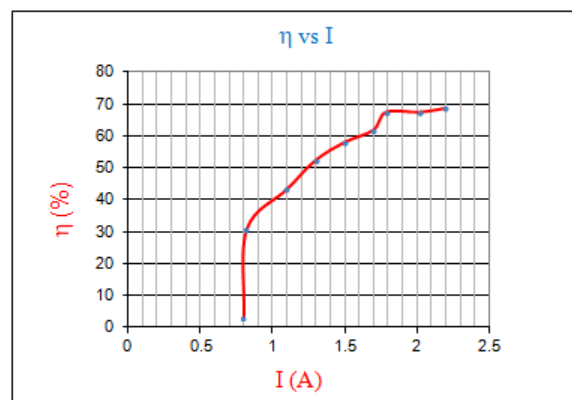


Figura u Eficiencia como función de la corriente absorbida (η vs I).
Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.

Tabla k Propuesta. Cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio del motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.

Voltaje promedio	Corriente promedio	Potencia promedio	Velocidad
E (V)	I (A)	P (W)	n (rpm)
120	1.79	145	1360

Metodología ✓ Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**.

Tabla l Valores medidos. Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo largo acumulativo**. $I = 3A$.

E	τ
V	lb _r plg
30	15

$$\tau_{\text{máximo excitación compuesta paralelo largo diferencial}} = 60 \text{ lb}_r \text{plg}$$

$$R_{\text{equivalente excitación compuesta paralelo largo diferencial}} = 10 \Omega$$

$$I_{\text{arranque excitación compuesta paralelo largo diferencial}} = 12A$$

Objetivo 4 MC

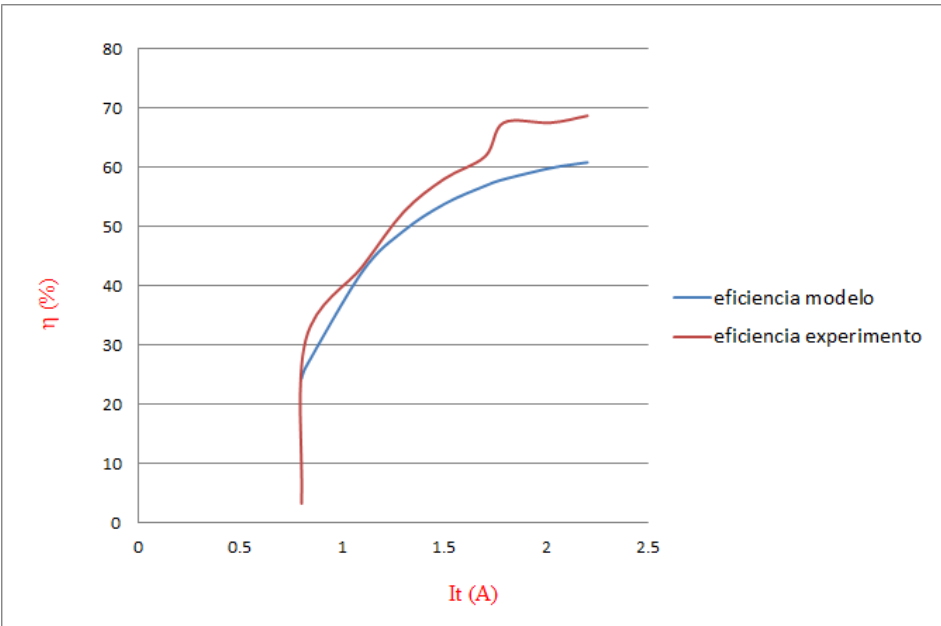


Figura v Comparación entre las eficiencias (experimento y modelo matemático). Motor de corriente directa con **excitación compuesta paralelo corto acumulativo**.

Tabla n Pérdidas y cálculo de la eficiencia. Motor de corriente directa con
excitación compuesta paralelo largo acumulativo.

R1 _{T1}	Rw	Resistencia del devanado de los polos de conmutación				0	Ω	Temperatura ambiente, T1		Temperatura de referencia, T
	Ra	Resistencia del devanado de armadura				7.55	Ω	°C		°C
	Rexc	Resistencia del devanado de excitación derivada (conexión serie)				270	Ω	25		234.5
	Rk	Resistencia del devanado serie				1.79	Ω			
	P	dato de placa				145.183536	W			
Temperatura de operación de los devanados, T2		25	25.5	26	26.5	27	27.5	28	28.5	29
R2 _{T2}	Rw	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ra	7.55	7.564547206	7.579094412	7.593641618	7.608188825	7.622736031	7.637283237	7.651830443	7.666377649
	Rexc	270	270.5202312	271.0404624	271.5606936	272.0809249	272.6011561	273.1213873	273.6416185	274.1618497
	Rk	1.79	1.79344894	1.796897881	1.800346821	1.803795761	1.807244701	1.810693642	1.814142582	1.817591522
Ederivado		118.57	118.54	118.04	117.68	117.32	116.96	116.8	116.39	116.07
Eserie		1.43	1.46	1.96	2.32	2.68	3.04	3.2	3.61	3.93
E		120	120	120	120	120	120	120	120	120
It		0.8	0.82	1.1	1.3	1.5	1.7	1.79	2.02	2.2
Ie		0.4	0.398	0.396	0.394	0.392	0.39	0.388	0.386	0.384
Rexc + Rreóstato = Req1		296.425	297.839196	298.0808081	298.680203	299.2857143	299.8974359	301.0309278	301.5284974	302.265625
Rreóstato		26.425	27.31896477	27.04034565	27.1195094	27.20478943	27.29627983	27.90954055	27.88687891	28.10377529
Ia		0.4	0.422	0.704	0.906	1.108	1.31	1.402	1.634	1.816
P=E*It		96	98.4	132	156	180	204	214.8	242.4	264
PRexc = Rexc * Ie ²		43.2	42.85148671	42.50348116	42.15599584	41.80904324	41.46263584	41.11678613	40.77150659	40.42680971
Preóstato = Rreóstato * Ie ²		4.228	4.327433295	4.240358844	4.209924162	4.180396763	4.151764162	4.201613873	4.15503341	4.144070289
PReq1 = Prexc+Preóstato		47.428	47.17892	46.74384	46.36592	45.98944	45.6144	45.3184	44.92654	44.57088
PReq1 = Req1 * Ie ²		47.428	47.17892	46.74384	46.36592	45.98944	45.6144	45.3184	44.92654	44.57088
Po = factor1 * P		21.7775304	21.7775304	21.7775304	21.7775304	21.7775304	21.7775304	21.7775304	21.7775304	21.7775304
Pw = Rw * Ia ²		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pa = Ra * Ia ²		1.208	1.347124825	3.756320456	6.233134412	9.340299525	13.0813773	15.01187448	20.4300506	25.28260953
Pb = factor2 * Ia ²		0.0096	0.01068504	0.02973696	0.04925016	0.07365984	0.102966	0.11793624	0.16019736	0.19787136
Pad = factor3 * P		0.96	0.984	1.32	1.56	1.8	2.04	2.148	2.424	2.64
Pk = Rk * It ²		1.1456	1.205915067	2.174246435	3.042586127	4.058540462	5.222937187	5.801643497	7.402427391	8.797142967
Pd		72.5287304	72.50417533	75.80167425	79.0284211	83.03947023	87.83921089	90.17538462	97.12074575	103.2660343
P _{mecánica} = P - Pd		23.4712696	25.89582467	56.19832575	76.9715789	96.96052977	116.1607891	124.6246154	145.2792542	160.7339657
η		24.44923917	26.31689499	42.5744892	49.34075571	53.86696098	56.94156329	58.01890847	59.93368575	60.88407793
τ		1.099330115	1.276725944	2.942805435	4.227523823	5.560856565	6.896603488	7.72554223	9.314121465	10.62824418

Metodología ✓✓:

P3 ¿Cuántas veces es mayor la corriente de arranque, que la corriente normal a plena carga para cada motor de corriente directa?

Tabla o # de veces en que la corriente de arranque es mayor que la corriente normal a plena carga para cada motor de corriente directa.

Excitación derivada			Excitación serie			Excitación compuesta paralelo largo acumulativo		
I	Iarranque	# veces	I	Iarranque	# veces	I	Iarranque	# veces
A	A		A	A		A	A	
2.3	18	7.826	2.62	12	4.580	1.79	12	6.703

Tabla p Comparación de los motores de corriente directa en cuanto τ_{arranque} y $R_{\text{equivalente}}$.

Excitación derivada		Excitación serie		Excitación compuesta paralelo largo acumulativo	
τ_{arranque} lb _r plg	$R_{\text{equivalente}}$ (Ω)	τ_{arranque} lb _r plg	$R_{\text{equivalente}}$ (Ω)	τ_{arranque} lb _r plg	$R_{\text{equivalente}}$ (Ω)
15	6.666	53.6	10	60	10

P4 ¿El dato de placa es el mismo para las motores corriente directa? No.

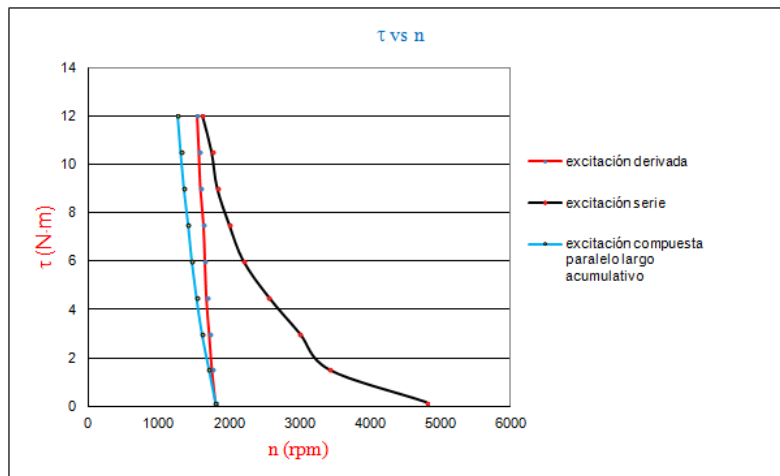
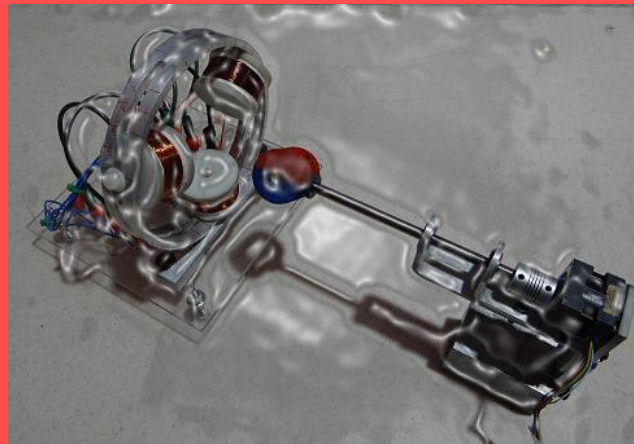


Figura w Par como función de la velocidad (τ vs n). Motores de corriente directa.

Tema 3

"Máquinas síncronas"



3.1 Componentes de las máquinas síncronas

Considere el **subtema 2.2 del Tema 2** (el generador de corriente alterna).

“Todas las máquinas eléctricas se componen de un sistema apto a producir un campo magnético llamado sistema inductor y de un sistema apto a sufrir la acción del campo inductor llamado sistema inducido”

Las máquinas síncronas pueden ser generadores, y entonces toman el nombre de alternadores o bien de motores y en este caso de motores síncronos.

Si hacemos trabajar a un generador en reversa, podemos convertir energía eléctrica en energía mecánica, tenemos lo que se llama un motor.

La palabra síncrono sirve para indicar que estas máquinas funcionan a velocidad rígidamente ligada a la frecuencia de la red; esta velocidad es llamada velocidad de sincronismo.

3.2 Principio operacional de las máquinas síncronas como generador y como motor

Inductor rotante. En la práctica se hace que gire el imán en vez de una espira y para ello, se dispone con un electroimán de varios pares de polos (figura 1). Entonces, se prefiere mantener fijo el inducido y hacer girar el inductor para tener solo 2 contactos arrastrantes que traen las corrientes mas pequeñas.

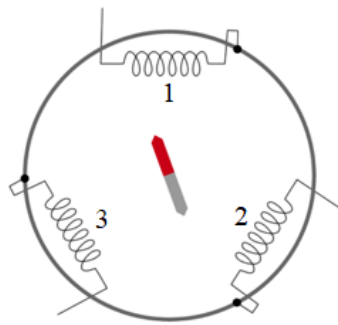


Figura 1 Generador elemental de corriente alterna trifásico.

Desde el punto de vista teórico esto no cambia nada, porque las fuerzas electromotrices son producidas por el movimiento relativo de los dos sistemas, inducido e inductor.

Se tiene además la ventaja de que el sistema inductor se puede construir en manera mas compacta y mas resistente a las exigencias mecánicas.

La potencia eléctrica se produce en grandes estaciones generadoras que contienen uno o más alternadores (o generadores de corriente alterna) y un medio mecánico para impulsarlos. Comúnmente, las turbinas de vapor proporcionan potencia mecánica que, a su vez, obtienen su energía del calor liberado quemando petróleo, gas o carbón, o bien, del calor de una reacción nuclear. En zonas donde existen abundantes caídas de agua, las turbinas hidráulicas proporcionan la potencia mecánica para impulsar los alternadores.

3.3 Fuerza electromotriz inducida y frecuencia

Todas las máquinas eléctricas, tanto las de corriente directa como las de corriente alterna, funcionan según los mismos principios básicos y solo unas pocas leyes fundamentales gobiernan el comportamiento de estas máquinas.

El valor eficaz (rms) de la ecuación 2 del **subtema 2.2 Tema 2** (fuerza electromotriz inducida) de acuerdo a las leyes básicas depende de la rapidez de variación del flujo, o sea de la velocidad del rotor, y de la magnitud de dicho flujo (ecuación 1).

$$E = E_{\text{rms}} = E_m / \sqrt{2} = 4.44 N f \phi_m \quad 1$$

El flujo es proporcionado por los ampere-vuelta de excitación. La fuerza electromotriz inducida es función de la frecuencia por un lado y de la corriente de excitación por otro lado.

El valor medio o promedio de la ecuación 2 del **subtema 2.2 Tema 2** (fuerza electromotriz inducida) es:

$$E_{\text{promedio}} = 0V \quad 2$$

Si el generador se conecta a una resistencia:

$$i(t) = e(t) / R = [N L_1 L_2 B \omega \sin \omega t] / R \quad 3$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t)$$

Donde:

$$I_m = (N L_1 L_2 B \omega) / R$$

El valor rms de las corrientes es:

$$I = I_{\text{rms}} = I_m / \sqrt{2} \quad 4$$

El gráfico en función del tiempo de las ecuaciones 1, 2 del **subtema 2.2 Tema 2** y 3 se muestra en la figura 2.

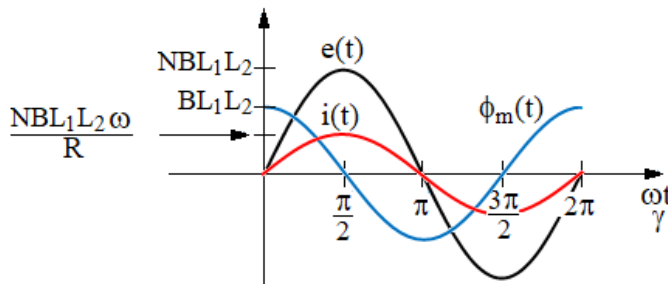


Figura 2 Gráfico en función del tiempo para $\phi_m(t)$, $e(t)$ e $i(t)$.

La potencia entregada a la resistencia (potencia instantánea) o la potencia que la resistencia consume es:

$$p(t) = e(t) i(t) = R i^2(t) = e^2(t) / R$$

$$p(t) = E_m I_m \sin^2 \omega t = R I_m^2 \sin^2 \omega t = [E_m^2 / R] \sin^2 \omega t$$

5

El gráfico en función del tiempo para $p(t)$ se muestra en la figura 3.

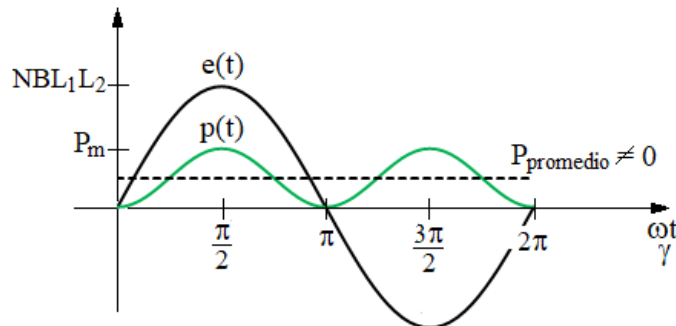


Figura 3 Potencia instantánea $p(t)$ y $P_{promedio}$.

El promedio de la potencia respecto al periodo de una oscilación se calcula mediante la ecuación 6.

$$P = P_{promedio} = P_{media} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} p(t) dt$$

6

Entonces:

$$P = P_{promedio} = P_{media} = [(E_m I_m) / 2] \cos \theta = E_{rms} I_{rms} \cos \theta = E I \cos \theta$$

7

“Esta ecuación se dedujo para una máquina elemental con una espira. La ecuación se aplica también a la máquina real”

La potencia promedio disipada por la resistencia R es:

$$P = P_{promedio} = P_{media} = (E_m I_m) / 2 = (R I_m^2) / 2 = E_m^2 / 2R = (NAB\omega)^2 / 2R$$

Un Wattmetro es un dispositivo que mide la potencia media entregada a una carga.

“Las corrientes y voltajes periódicos entregan a las cargas una potencia media”

De acuerdo a lo anterior, la potencia instantánea siempre es positiva para una carga resistiva. El voltaje o la corriente, alternan su signo.

Potencia en transmisión monofásica

El voltaje y corriente entregado por un generador síncrono monofásico (figura 4) es de forma senoidal (ecuaciones 8).

$$\begin{aligned} e(t) &= E_m \sin(\omega t + \alpha) \\ i(t) &= I_m \sin(\omega t - \theta) \\ \alpha &= 0, \beta = \alpha - \theta \end{aligned} \quad 8$$

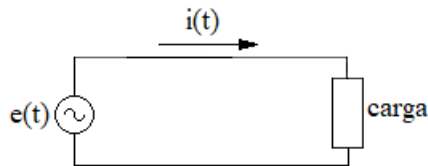


Figura 4 Sistema simple de transmisión de potencia.

Donde θ es el defasamiento que existe entre el voltaje y la corriente, llamado ángulo del factor de potencia.

La potencia transmitida está definida por la ecuación 9.

$$p(t) = E_m I_m \sin(\omega t) \sin(\omega t - \theta) \quad 9$$

Utilizando la identidad a en la ecuación 9, se obtiene la ecuación 10.

$$\sin A \sin B = \frac{1}{2} \cos(A-B) - \frac{1}{2} \cos(A+B) \quad \underline{a}$$

$$p(t) = [(E_m I_m)/2] [\cos(\theta) - \cos(2\omega t - \theta)] \quad 10$$

Y en función de sus valores rms o efectivos la ecuación 10 se convierte en la ecuación 11.

$$p(t) = E I \cos(\theta) - E I \cos(2\omega t - \theta) \quad 11$$

Utilizando la identidad b en la ecuación 11, se obtiene la ecuación 12.

$$\cos(A-B) = \cos A \cos B + \sin A \sin B \quad \underline{b}$$

$$p(t) = E I \cos(\theta) - E I \cos(2\omega t) \cos(\theta) - E I \sin(2\omega t) \sin(\theta) \quad 12$$

$$p(t) = E I \cos \theta [1 - \cos(2\omega t)] - E I \sin(2\omega t) \sin(\theta)$$

Las componentes de la potencia compleja por definición son:

$$P = E I \cos \theta \quad 13$$

$$Q = E I \sin \theta$$

Entonces, la ecuación 12 se transforma en la ecuación 14.

$$p(t) = P [1 - \cos(2\omega t)] - Q \sin(2\omega t) \quad 14$$

De la ecuación 14 se puede obtener las siguientes conclusiones en cuanto a P y Q.

Conclusión:

1 La potencia real P está definida como el valor promedio de $p(t)$ y físicamente es la potencia útil que se transmite, donde su magnitud depende fuertemente del factor de potencia.

2 La potencia reactiva Q es aquella componente de $p(t)$ cuyo valor promedio es cero y por lo tanto es incapaz de efectuar un trabajo útil y

3 De hecho P y Q tienen las mismas unidades, pero para diferenciarlos P se expresa en watts (W) y Q en voltamperes reactivos (var).

El caso general implica que $\alpha \neq 0$, por lo tanto:

$$\begin{aligned} e(t) &= E_m \sin(\omega t + \alpha) \\ i(t) &= I_m \sin(\omega t + \beta) \\ \alpha &\neq 0, \beta = \alpha - \theta \end{aligned}$$

La potencia instantánea $p(t)$ está definida por la ecuación 15.

$$\begin{aligned} p(t) &= P - P \cos(2\omega t) (\cos 2\alpha) - Q \cos(2\omega t) (\sin 2\alpha) \\ &\quad + P \sin(2\omega t) (\sin 2\alpha) - Q \sin(2\omega t) (\cos 2\alpha) \end{aligned} \quad 15$$

Potencia en sistemas trifásicos balanceados

En la actualidad todos los sistemas de potencia se alimentan por generadores síncronos trifásicos.

Se dice que un sistema es balanceado, si su generación y carga son balanceados (figura 5), de lo contrario si cualquiera de ellos o ambos son desbalanceados, entonces el sistema será desbalanceado.

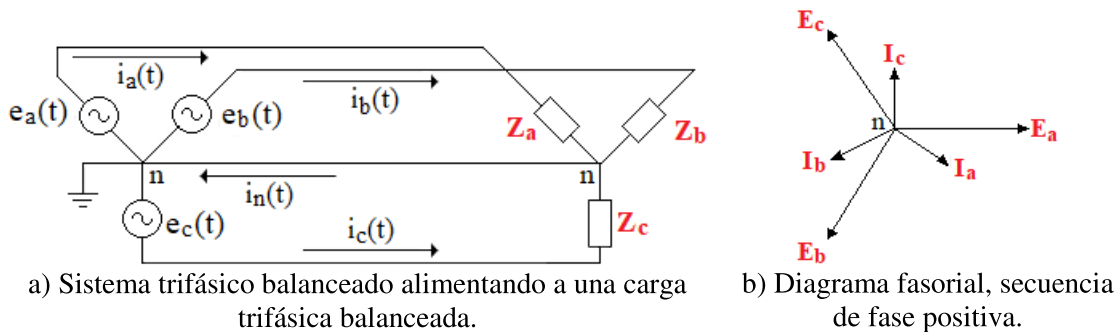


Figura 5 Sistema trifásico balanceado.

Se dice que la generación es balanceada si las fuentes de voltaje son iguales en magnitud y defasadas 120° una de otra.

Así en función de los valores rms y tomando como referencia a la fase a ($\alpha = 0^\circ$), los voltajes de fase son (ecuaciones 16):

$$\begin{aligned} e_a(t) &= \sqrt{2} E \sin(\omega t) \\ e_b(t) &= \sqrt{2} E \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_c(t) &= \sqrt{2} E \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad 16$$

En los diagramas fasoriales los voltajes entre fases p y q se forman trazando una ruta de p a q a través de "n" (figura 6), así para $\mathbf{E}_{ab}$ se tiene:

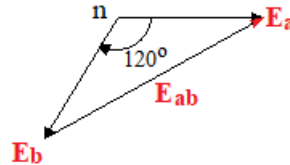


Figura 6 Obtención gráfica del voltaje de línea.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{ab} &= \mathbf{E}_a - \mathbf{E}_b = \sqrt{2} E \angle 0^\circ - \sqrt{2} E \angle -120^\circ \\ &= (\sqrt{2}E + j0) - [\sqrt{2} E \cos(-120^\circ) + j\sqrt{2} E \sin(-120^\circ)] \end{aligned} \quad 17$$

Como se sabe: $\cos(\alpha) = \cos(-\alpha)$ y $\sin(-\alpha) = -\sin(\alpha)$
 $\cos(120^\circ) = -\frac{1}{2}$ y $\sin(120^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{2}$

Usando las igualdades anteriores la ecuación 17 se convierte en:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{ab} &= \mathbf{E}_a - \mathbf{E}_b = (\sqrt{2}E + j0) - \left[\sqrt{2} E \left(-\frac{1}{2} \right) - j\sqrt{2} E \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] \\ &= \left[\frac{3\sqrt{2}}{2} E \right] + j \left[\frac{\sqrt{3}\sqrt{2}}{2} E \right] \end{aligned} \quad 18$$

La magnitud del fasor $\mathbf{E}_{ab}$ (ecuación 18) es:

$$E_{abm} = \sqrt{3}\sqrt{2}E$$

El ángulo del fasor $\mathbf{E}_{ab}$ es:

$$\tau = \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}}{3}$$

Por lo tanto el fasor $\mathbf{E}_{ab}$ es:

$$\mathbf{E}_{ab} = \mathbf{E}_a - \mathbf{E}_b = \sqrt{3}\sqrt{2} E \angle 30^\circ \quad 19$$

El valor rms del fasor $\mathbf{E}_{ab}$ es:

$$E_{abrms} = \frac{E_{abm}}{\sqrt{2}} = \sqrt{3}E = 2E \cos 30^\circ = E_{ab} = E_L \quad 20$$

Por otro lado, se dice que existe una carga balanceada si cada fase alimenta a una carga de igual magnitud y ángulo de fase.

$$Z_a = Z_b = Z_c = Z \quad 21$$

Por lo tanto de las ecuaciones 16 y 21 las corrientes de fase también serán balanceadas, las cuales están representadas en la figura 5b.

La potencia trifásica instantánea transmitida se puede hallar sumando las potencias instantáneas de cada fase, es decir:

$$p_{3\phi}(t) = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c$$

Por lo que la potencia media trifásica es:

$$P_{3\phi} = 3 E I \cos \theta = 3 P \quad 22$$

Conclusión:

4 De la figura 5b se observa que la suma de las corrientes y voltajes trifásicos es igual a cero y por lo tanto ningún conductor de retorno es necesario.

5 De la ecuación 20 se deduce que los voltajes de línea E_L son de igual magnitud con un valor de $\sqrt{3}$ veces el voltaje de fase E , con esto en mente la ecuación 22 se puede escribir como:

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} E_L I \cos \theta \quad 23$$

6 La potencia reactiva trifásica es:

$$Q_{3\phi} = 3 E I \sin \theta = 3 Q \quad 24$$

$$Q_{3\phi} = \sqrt{3} E_L I \sin \theta$$

7 De las ecuaciones 23 y 24 se tiene que la potencia trifásica es constante y

8 De la simetría vista anteriormente se observa que con el conocimiento del voltaje y corriente de una fase se tiene automáticamente los valores trifásicos con lo cual solo es necesario un análisis por fase.

Potencia compleja

Por definición la potencia compleja es:

$$S \triangleq E^* \cdot I \quad 25$$

Si también se define al voltaje y a la corriente en forma fasorial como:

$$\mathbf{E} = E e^{j\alpha} \quad \text{y} \quad \mathbf{I} = I e^{j\beta} \quad 26$$

Sustituyendo la ecuación 26 en la ecuación 25 se obtiene la ecuación 27.

$$\begin{aligned} \mathbf{S} &= E I \cos \theta + j E I \sin \theta \\ &= P + j Q \end{aligned} \quad 27$$

donde $\theta = \alpha - \beta$ y es el que define el signo de Q

Así para $\theta (+)$ se tiene que Q (+) y para $\theta (-)$ se tiene que Q(-) (figura 7) y si se toma el voltaje como referencia ($\alpha=0$) se tiene que:

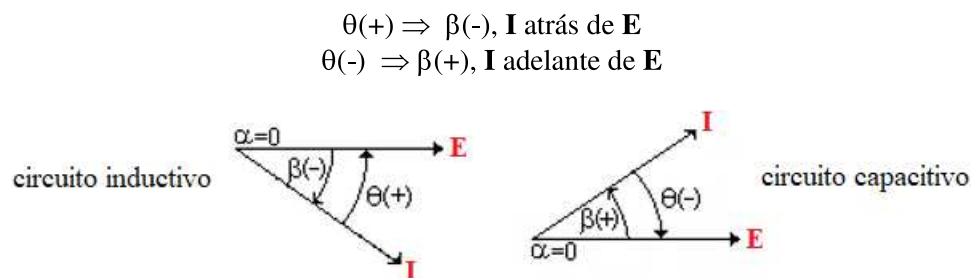


Figura 7 El signo de la potencia reactiva Q en función de θ .

Conclusión:

9 De la figura 7, se asigna un signo positivo a Q para un circuito inductivo y un signo negativo para un circuito capacitivo.

Para una carga de tipo impedancia o admitancia tenemos que:

$$\mathbf{E} = \mathbf{Z} \mathbf{I} \quad \text{y} \quad \mathbf{I} = \mathbf{Y} \mathbf{E} \quad 28$$

La ecuación 28 convierte a la ecuación 27 en:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \mathbf{I}^* = P + j Q = \mathbf{Z} \mathbf{I}^2 = \mathbf{Y}^* \mathbf{E}^2 \quad 29$$

A la magnitud de la potencia compleja $\mathbf{S}$ se le conoce como potencia aparente y tiene un valor de:

$$S = E I \quad 30$$

3.4 Circuito equivalente y diagramas fasoriales

El voltaje E_o generado por el alternador depende del flujo por polo, el cual, a su vez, depende de la corriente de corriente directa que fluye en los arrollamientos de los polos. Por consiguiente, puede variarse el voltaje del generador, por fase, ajustando la excitación de corriente directa. Sin carga, el voltaje E_T , medido en las terminales del generador, es igual al voltaje generado E_o (figura 8).

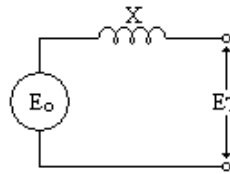


Figura 8 Voltaje generado E_o , $E_T = E_o$ sin carga.

Si el alternador está cargado, su voltaje en las terminales cambiará, aun cuando se mantenga constante la excitación de corriente directa. Esto se debe a que el alternador tiene una impedancia interna, compuesta de la resistencia y reactancia de los arrollamientos del estator. Por lo tanto, un alternador puede representarse mediante un circuito como el mostrado en la figura 9, en el que X es la reactancia del estator, R la resistencia del arrollamiento (la resistencia R siempre es menor que la reactancia X) y E_o el voltaje del estator generado a medida que los polos barren los conductores del estator.

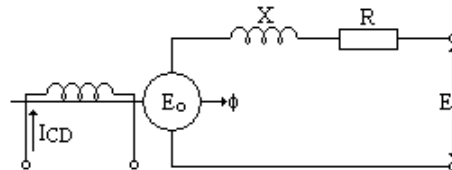


Figura 9 Circuito equivalente por fase del alternador trifásico.

Como se muestra en la figura 10 el valor de la reactancia síncrona, se encuentra midiendo el voltaje E_T , sobre el circuito abierto y, después, midiendo la corriente, cuando se colocan las terminales en corto circuito (Cuando un alternador que trabaja produciendo un voltaje nominal de salida se somete repentinamente a un corto circuito, habrá momentáneamente corrientes de gran intensidad. Sin embargo, al subsistir el corto circuito, las corrientes intensas disminuirán rápidamente a valores seguros). La corriente de corto circuito será $I = E_o/X$ (despreciando el valor de la resistencia), a partir de lo cual se encuentra la reactancia síncrona X . Esta reactancia no es constante, si no que depende del grado de saturación en la máquina.

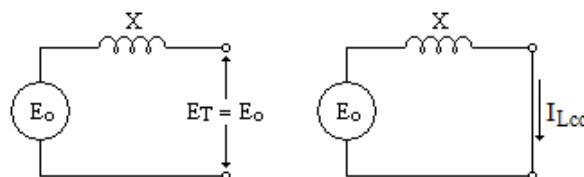


Figura 10 Cálculo de la reactancia síncrona X por fase del alternador trifásico.

Por lo tanto, el circuito equivalente de un alternador es muy sencillo y, con el, se explican todas las características principales de esta máquina. Por ejemplo, es de esperar que si se conecta a las terminales una carga resistiva, o una inductiva, el voltaje E_T caerá. Por otro lado, si se conecta una carga capacitiva a las terminales, aumentará el voltaje, debido al efecto de resonancia.

La reactancia síncrona de un alternador siempre es muy grande, de modo que, incluso bajo condiciones de corto circuito, la corriente rara vez excede a 1.5 veces la corriente nominal a plena carga. Sin embargo, debe mencionarse que, para algunos de los primeros ciclos que siguen a un corto circuito, la corriente puede ser mucho mayor, debido a las propiedades transitorias de la máquina (los efectos transitorios no se estudian en esta asignatura).

La figura 11 muestra el circuito equivalente y el diagrama fasorial para el caso resistivo.

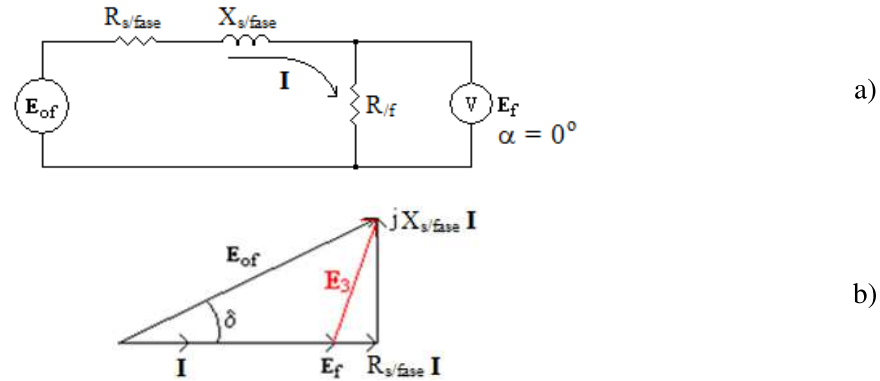


Figura 11 a) Circuito equivalente y b) diagrama fasorial. Caso resistivo.

La figura 12 muestra el circuito equivalente y el diagrama fasorial para el caso inductivo.

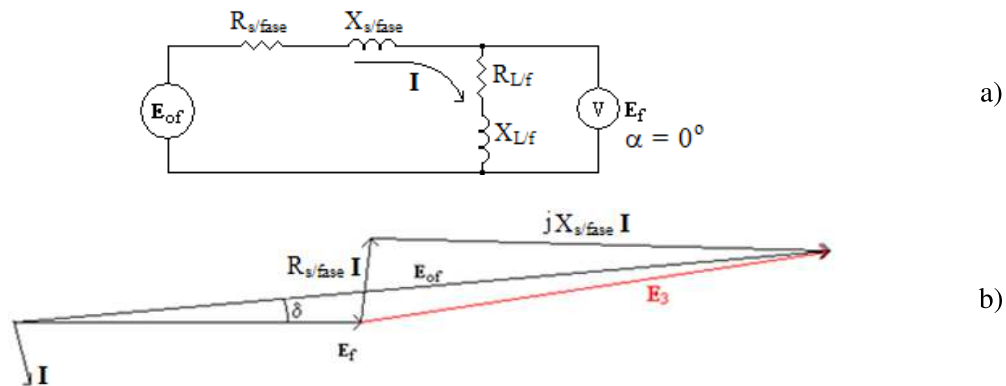


Figura 12 a) Circuito equivalente y b) diagrama fasorial. Caso inductivo.

La figura 13 muestra el circuito equivalente y el diagrama fasorial para el caso capacitivo.

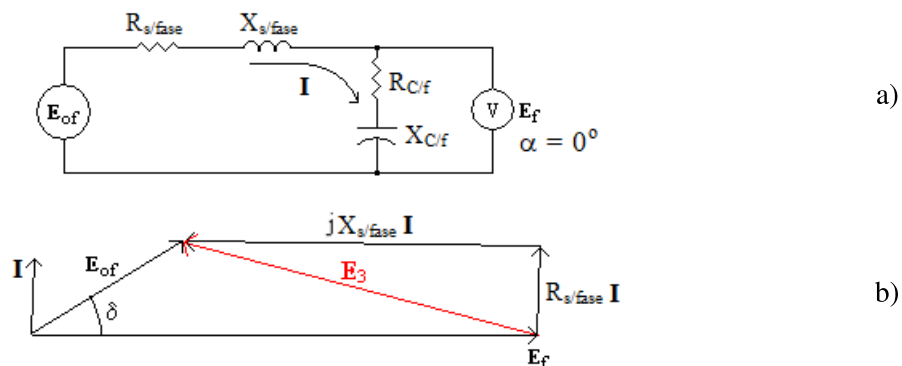


Figura 13 a) Circuito equivalente y b) diagrama fasorial. Caso capacitivo.

Observación:

1 Los diagramas fasoriales se construyen empleando tensiones de fase.

2 En los diagramas fasoriales y para cualquier tipo de carga el voltaje interno es:

$$E_{of} = E_f + R_{s/fase} I + jX_{s/fase} I$$

3.5 Regulación de tensión con diferentes tipos de carga

La % de regulación de tensión se calcula mediante la ecuación 7.

$$\% \text{ regulación de tensión} = \frac{E_{of} - E_f}{E_{of}} 100 \quad 31$$

Los circuitos de las figuras 11a, 12a y 13a se parecen mucho al de una línea de transmisión, en la que E_o y E_T son los voltajes del transmisor y el receptor. De echo, el flujo de potencia real y reactiva, en este circuito, lo dictan los mismos factores que en el caso de una línea de transmisión, por que los modelos matemáticos del **complemento: Problema 1** (la impedancia de la línea de transmisión es la impedancia interna del generador) son aplicables ciento por ciento al caso del generador síncrono.

De manera breve:

- Si E_o está en fase con E_T , y si los dos voltajes son desiguales, fluirá potencia reactiva (Si E_o es menor que E_T , fluirá potencia reactiva de E_T al voltaje E_o . Si E_o es mayor que E_T , entonces fluirá potencia reactiva de E_o hacia E_T).
- Si E_o esta adelantado respecto a E_T , fluirá potencia real de E_o hacia E_T , suministrando potencia eléctrica a la carga. En la misma manera que en el caso de una línea de transmisión, la potencia real máxima que se puede entregar está dada por la ecuación v:

$$P_{pq} = -P_{qp} = P_{\max} \sin \delta \quad \text{donde: } P_{\max} = \frac{E_p E_q}{X} \quad v$$

La única manera de modificar a la potencia transmitida es por una variación del ángulo δ , y también que la máxima potencia que se puede transmitir se logra cuando $\delta = 90^\circ$ el cuál se conoce como "límite de estabilidad estático", una vez alcanzado este límite cualquier potencia añadida ocasionará que el sistema sea inestable.

Para variar la potencia reactiva, debe variarse E_o , y esto se logra fácilmente, cambiando la corriente de excitación de corriente directa en los arrollamientos del rotor.

Para los casos resistivo e inductivo los diagramas fasoriales de las figuras 11b y 12b muestran que el voltaje en terminales cae por efecto de la carga lo que implica que el % de regulación de tensión sea positivo. La caída de tensión E_3 en la impedancia interna crece a medida que la carga aumenta.

Para el caso capacitivo el diagrama fasorial de la figura 13b muestra que el voltaje en terminales aumenta por efecto de la carga lo que implica que el % de regulación de tensión sea negativo. La caída de tensión E_3 en la impedancia interna crece a medida que la carga aumenta.

3.6 Operación en paralelo de los generadores síncronos

La velocidad de rotación de múltiples alternadores muy potentes, que están interconectados a través de diferentes líneas, determina la frecuencia de un gran sistema de energía. La gran inercia y la capacidad de estos generadores son tan elevadas que ninguna carga o cambio puede afectar su velocidad de giro. Por esta razón, la frecuencia de un sistema eléctrico se mantiene bastante constante.

Si un alternador necesita generar energía para un sistema eléctrico ya establecido, debe funcionar a la misma frecuencia que ese sistema. Un sistema que trabaja a 60.000Hz no puede recibir energía de un alternador que funcione a 60.001Hz. Ambos deben trabajar exactamente a la misma frecuencia. Lograr esto no es tan complicado como parece inicialmente, ya que cuando un alternador se conecta a un sistema ya existente, se activan fuerzas que aseguran que la frecuencia se mantenga constante.

Sincronizar un alternador con un sistema extenso (como un bus infinito) se asemeja a unir un engranaje pequeño con uno enorme y muy potente. Cuando los dientes de ambos engranajes se alinean correctamente al momento de hacer contacto, la conexión es fluida. Por el contrario, si los dientes del engranaje pequeño colisionan con los del grande en el momento decisivo, se generará un impacto que podría dañar el engranaje más pequeño.

Para realizar una sincronización adecuada de un alternador, es necesario que primero su frecuencia coincida con la de la fuente. Asimismo, la secuencia de fases (rotación) tiene que ser igual. Regresando al caso de los engranajes, sería impensable unir dos engranajes que tengan dientes en contacto con velocidades opuestas, aunque sean del mismo valor.

Un aspecto importante a considerar al unir dos engranajes es asegurarse de que el diente de uno se ajuste dentro de la ranura del otro. Desde una perspectiva eléctrica, esto implica que el voltaje de un generador debe estar sincronizado con el voltaje de la fuente.

Finalmente, al unir dos engranajes, se elige un tamaño de diente que sea compatible con el engranaje principal. En términos eléctricos, la amplitud del voltaje de un alternador debe coincidir con la amplitud del voltaje de la fuente.

La representación gráfica de lo anterior se muestra mediante las figuras 14, 15 y 16.

Considere las características de la fuente 1 (F1 “alternador”), secuencia de fase positiva.

$$E_{aF1} = \frac{230}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ, f = 60\text{Hz}$$

Y considere las características de la fuente 2 (F2 “bus infinito”), secuencia de fase positiva.

$$E_{aF2} = \frac{230}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ, f = 60\text{Hz}$$

La figura 14 muestra los fasores y las funciones en el tiempo de la F1 “alternador”.

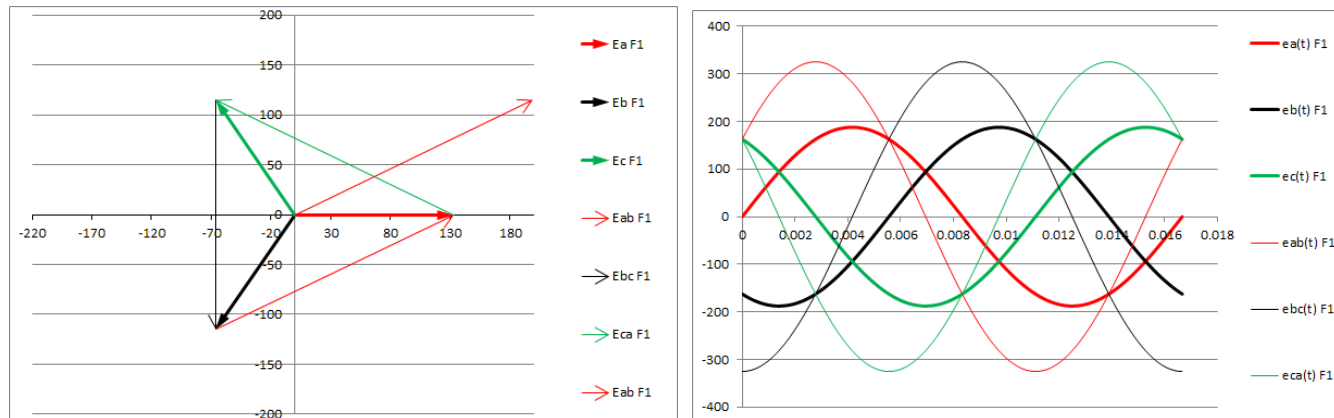


Figura 14 Diagrama fasorial y gráfico en función del tiempo de la F1.

La figura 15 muestra los fasores y las funciones en el tiempo de la F2 “bus infinito”.

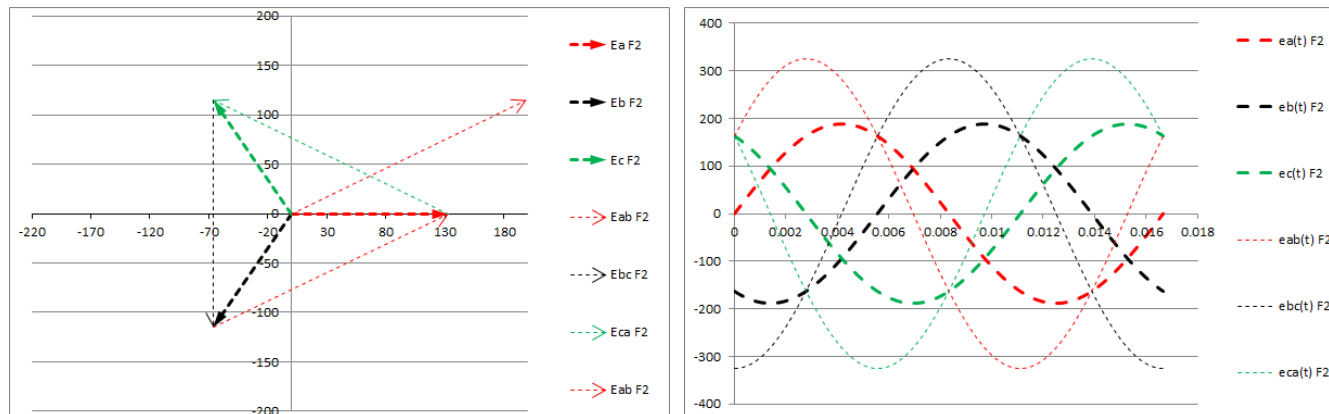


Figura 15 Diagrama fasorial y gráfico en función del tiempo de la F2.

La conexión de la F1 “alternador” con la F2 “bus infinito” se efectúa cuando las diferencias de potencial V_1 , V_2 y V_3 sean 0 (la conexión de las lámparas de sincronización o un sincronoscopio o 3 voltímetros muestran como un sistema se mueve con respecto al otro). La figura 16 muestra las dos fuentes conectadas (ambos sistemas se mueven a la misma velocidad).

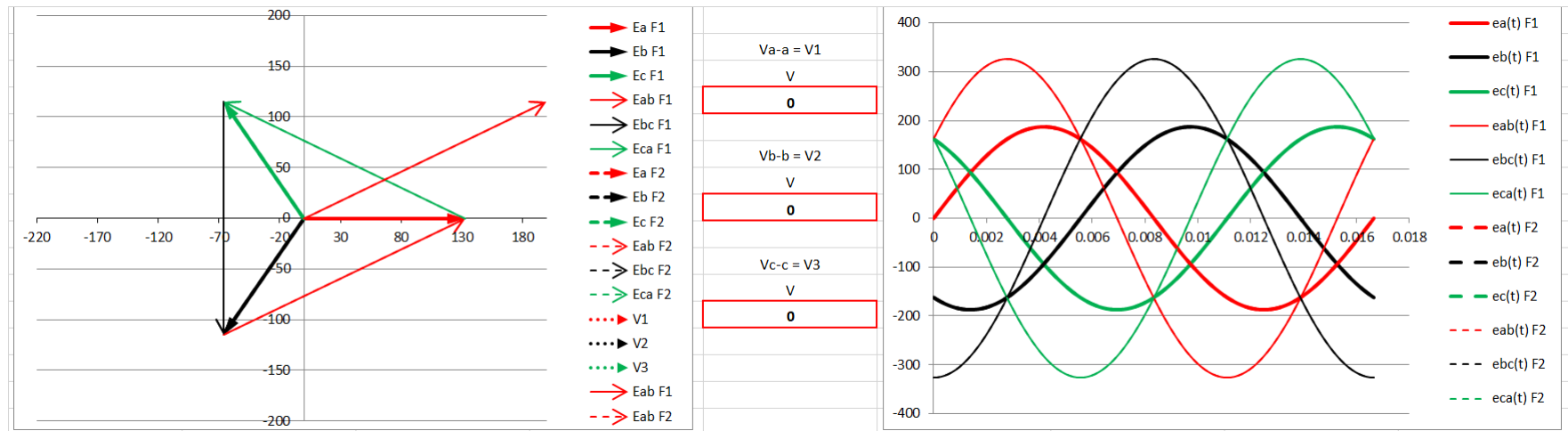


Figura 16 Conexión de F1 “alternador” con la F2 “bus infinito”. Iguales frecuencias, iguales secuencias de fases, iguales defasamientos e iguales tensiones.

Entonces, cuando las diferencias de potencial V_1 , V_2 y V_3 sean 0V el interruptor que esta entre ambos sistemas se puede cerrar, el alternador esta perfectamente sincronizado con la red. Por ningún motivo el interruptor debe cerrarse si V_1 , V_2 y V_3 son diferentes de cero (cerrar el interruptor implicaría que posiblemente la F1 “alternador” se destruya).

Por lo tanto, los requisitos que se deben cumplir para sincronizar el generador con el bus infinito son:

- Igual tensión en terminales
- Igual frecuencia de generación
- Igual desplazamiento angular de fases
- Igual secuencia de fases

3.7 Métodos de arranque de los motores síncronos

El nombre del motor síncrono proviene de la expresión velocidad síncrona, que se refiere a la rapidez inherente del campo magnético que gira del estator. La rapidez de rotación que es natural se establece por la cantidad de polos y la frecuencia del voltaje que se aplica.

En estado estacionario la velocidad síncrona se define por la ecuación 32.

$$n_s = (2/p) 60 f_e \text{ rpm} \quad 32$$

Donde:

n_s	velocidad síncrona, rpm
f_e	frecuencia del voltaje en terminales (frecuencia eléctrica), cps
p	número de polos

La velocidad síncrona se refiere a la rapidez mecánica a la que funciona la máquina síncrona en condiciones estables. Similares al motor de inducción, los motores síncronos también emplean un campo magnético en movimiento. Sin embargo, a diferencia de los motores de inducción, el torque que producen no depende de las corrientes inducidas en el rotor. En resumen, el funcionamiento del motor síncrono se basa en lo siguiente: se introduce una fuente de corriente alterna polifásica en los devanados del estator, generando así un campo magnético rotativo. Por otro lado, se envía una corriente continua a los devanados del rotor, lo que crea un campo magnético estático. La construcción del motor está diseñada de tal manera que la interacción entre estos dos campos magnéticos provoca que el rotor gire a la misma velocidad que el campo magnético en movimiento. Una característica distintiva del motor síncrono es que mantiene una velocidad constante, independientemente de las condiciones de carga, incluso hasta su carga máxima. Esta velocidad estable puede mantenerse a pesar de posibles variaciones en el voltaje de la línea. Por ello, es un motor ideal para situaciones donde se requiere una medición precisa de la velocidad y esta debe ser constante. Si se coloca una carga en el eje del rotor, experimentará un ligero desfase en relación al campo giratorio, pero su velocidad síncrona permanecerá. Para ilustrar este desfase, se puede pensar en el rotor conectado a un campo en rotación mediante una correa flexible. Las cargas más pesadas provocarán que la correa se estire, lo que hará que el rotor tenga un desfase con respecto al campo del estator, aunque seguirá girando a la misma rapidez. Si la carga excede un límite aceptable, el rotor perderá la sincronización con el campo rotativo y se detendrá. En esta situación, se considera que el motor está sobrecargado.

El motor síncrono carece de un par de arranque propio y su rotor, de modo que, una vez que el motor se detiene, no es posible hacer que el rotor se acople magnéticamente con el campo magnético en movimiento. Por esta razón, todos los motores síncronos requieren un método de arranque. La manera más simple de iniciar el motor síncrono es emplear otro motor que lo empuje hasta que el rotor logre alrededor del 90% de su velocidad síncrona. Una vez alcanzado este punto, el motor de arranque se separa y el rotor se acopla al campo magnético en rotación (el devanado de corriente continua se excita), permitiendo que el motor genere el par de operación y gire a velocidad síncrona. En la práctica, el método de arranque más común implica que el rotor cuente con un devanado de inducción tipo jaula de ardilla. Este devanado de inducción permite que el rotor alcance una velocidad cercana a la síncrona, actuando como un motor de inducción. La jaula de ardilla sigue siendo útil incluso después de que el motor ha alcanzado la velocidad síncrona, ya que ayuda a reducir las oscilaciones del rotor ocasionadas por cambios repentinos en la carga.

En la figura 17^[1] se muestra una máquina síncrona de polos salientes, 2 polos, 3 fases, conectada en estrella. Los devanados del estator están idénticamente distribuidos senoidalmente, desplazados 120° , uno con respecto del otro con N_s vueltas equivalentes y resistencia r_s . El rotor está construido de un devanado de campo y tres devanados de amortiguamiento. El devanado de campo (devanado fd) tiene N_{fd} vueltas equivalentes y resistencia r_{fd} . Un devanado de amortiguamiento se encuentra en el mismo eje magnético de el devanado de campo. Este devanado, el devanado kd, tiene N_{kd} vueltas equivalentes con resistencia r_{kd} . El eje magnético del segundo y tercer devanados de amortiguamiento es el eje q, los devanados kq1 y kq2 tiene N_{kq1} y N_{kq2} vueltas equivalentes y resistencia r_{kq1} y r_{kq2} respectivamente. En la figura 17 los ejes de los devanados del estator son señalados por a_s , b_s y c_s . El uso de los ejes d y q fueron introducidos por Park.

En este tipo de máquina, los devanados de amortiguamiento pueden servir para que el motor arranque, los devanados amortiguadores produce arranque propio inductivo. Cuando se arranca el motor por este medio, la excitación de cd del rotor se remueve primero. Al aproximar la velocidad operativa del motor, el devanado de cd se excita y el rotor entra en acoplamiento con el campo magnético giratorio.

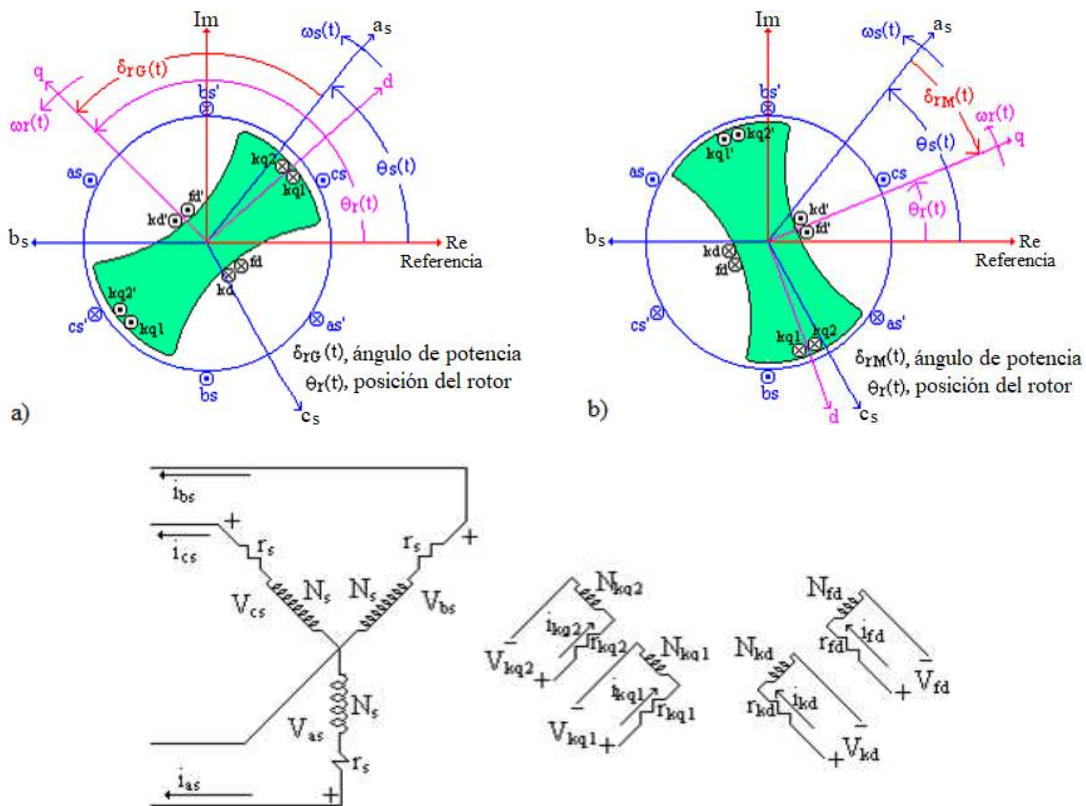


Figura 17 Máquina de polos salientes, 3 fases, 2 polos, conectada en estrella (a) acción generador (b) acción motor.

[1] *ELECTRIC MACHINE THEORY FOR POWER ENGINEERS*

Van E. Mablekos

HARPER & ROW, PUBLISHERS, New York

ISBN 0-06 044149-6

Ingeniería Eléctrica

238

Una manera alternativa de arrancar al motor síncrono trifásico es paralelar el alternador con el bus infinito, (debe cumplirse ciento por ciento el **subtema 3.6**). El sistema de control del sistema debe permitir migrar al generador síncrono conectado con el bus infinito al motor síncrono en donde el sistema que impulsaba (turbina) al generador ahora es un freno (carga).

3.8 Análisis fasorial del motor síncrono bajo diferentes condiciones de carga y de excitación

Un motor síncrono tiene la misma construcción que un alternador y, por tanto, posee las mismas propiedades eléctricas. De hecho, un alternador puede funcionar como un motor síncrono, y viceversa, siendo la única distinción que, como motor, la máquina recibe potencia eléctrica y la convierte en potencia mecánica, mientras que, como alternador, realiza lo inverso.

El circuito de un motor síncrono es idéntico al de un alternador, consistiendo de una reactancia síncrona X (por fase) y un voltaje inducido de ca E_o , creado por el flujo de corriente directa proveniente de los polos del rotor en el estator. El motor síncrono se conecta a una barra colectora infinita. Una barra colectora infinita es una fuente de potencia eléctrica tan inmensa que nada que se le conecte cambiará su voltaje, su frecuencia o los ángulos de fase entre sus tres fases. De hecho, una barra colectora infinita es una fuente de voltaje que no tiene impedancia interna. La fuente E_T de la figura 18 se considera como una de las fases de una barra colectora infinita.

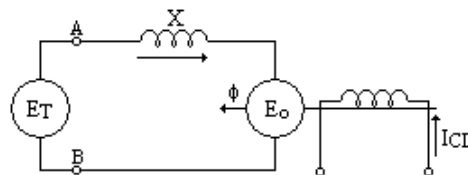


Figura 18 Circuito equivalente por fase del motor síncrono.

El circuito de la figura 18 se parece mucho al de una línea de transmisión, en la que E_T y E_o son los voltajes del transmisor y el receptor. De echo, el flujo de potencia real y reactiva, en este circuito, lo dictan los mismos factores que en el caso de una línea de transmisión, por que los modelos matemáticos del **complemento: Problema 1** (la impedancia de la línea de transmisión es la impedancia interna del generador) son aplicables ciento por ciento al caso del motor síncrono.

De manera breve:

- Si E_o está en fase con E_T , y si los dos voltajes son desiguales, fluirá potencia reactiva (Si E_o es menor que E_T , fluirá potencia reactiva de la fuente al motor. Si E_o es mayor que E_T , entonces fluirá potencia reactiva del motor hacia la fuente).
- Si E_o esta atrasado respecto a E_T , fluirá potencia real de la barra colectora infinita hacia el motor, dándole energía para soportar su carga mecánica. En la misma manera que en el caso de una línea de transmisión, la potencia real máxima que se puede entregar está dada por la ecuación v:

$$P_{\max} = \frac{E_o E_T}{X} \quad \text{v}$$

Para variar la potencia reactiva, debe variarse E_o y esto se logra fácilmente, cambiando la corriente de excitación de corriente directa en los arrollamientos del rotor.

Para incrementar la potencia real (para un valor fijo de E_o y E_T), debe aumentarse el ángulo de fase entre E_o y E_T , y esto sucede automáticamente cuando se aumenta la carga mecánica sobre el motor. Cuando está funcionando sin carga, sólo se necesita una pequeña cantidad de potencia mecánica, para vencer las pérdidas por rozamiento y por rozamiento con el aire, como consecuencia el motor sólo consume una pequeña cantidad de potencia eléctrica real. El ángulo de fase entre E_o y E_T es pequeño bajo condiciones de no carga.

Conforme se aumenta la carga mecánica, E_o se atrasa más y más respecto a E_T y cuando el atraso es de 90° , la potencia del motor alcanzará su valor máximo. Si se aumenta la carga mecánica más allá de este punto, la máquina se saldrá de tiempo y tenderá a detenerse (pérdida de sincronismo).

Para modelar el motor síncrono usaremos la ecuación **iv** con el propósito de calcular I_L , E_3 , W_{13f} , var_{13f} , W_{23f} , var_{23f} y por consecuencia pérdidas P_{L3f} y pérdidas Q_{L3f} .

$$\begin{aligned} P_{pq} &= \frac{1}{R^2 + X^2} (R E_p^2 - R E_p E_q \cos \delta + X E_p E_q \sin \delta) \\ Q_{pq} &= \frac{1}{R^2 + X^2} (X E_p^2 - X E_p E_q \cos \delta - R E_p E_q \sin \delta) \end{aligned} \quad \text{iv}$$

donde $\delta = \angle E_p - \angle E_q$

P_{qp} y Q_{qp} no se consideran ya que son desconocidos. Se tiene un sistema de dos ecuaciones no lineales con dos incógnitas: $E_q = E_{oL}$ y $\delta = \delta_e$. P_{pq} , Q_{pq} , R , X y E_p son valores conocidos.

Se empleará el método de Newton Raphson de los cuatro pasos para resolver el sistema. De acuerdo con el método, la ecuación **NR1** muestra las funciones correspondientes.

$$\begin{aligned} \vec{f}(\vec{x}) &= \vec{B} \\ f_1(X_1, X_2) &= \frac{1}{R^2 + X^2} [R E_p^2 - R E_p E_q \cos \delta + X E_p E_q \sin \delta] \\ f_2(X_1, X_2) &= \frac{1}{R^2 + X^2} [X E_p^2 - X E_p E_q \cos \delta - R E_p E_q \sin \delta] \end{aligned} \quad \text{NR1}$$

El **paso 1** implica calcular el vector $\Delta \vec{B}(i)$, usando **NR2**.

$$\Delta \vec{B}(i) = \begin{bmatrix} P_{pq} - \left[\frac{1}{R^2 + X^2} [R E_p^2 - R E_p E_q \cos \delta + X E_p E_q \sin \delta] \right] \\ Q_{pq} - \left[\frac{1}{R^2 + X^2} [X E_p^2 - X E_p E_q \cos \delta - R E_p E_q \sin \delta] \right] \end{bmatrix} \quad \text{NR2}$$

En el **paso 2** se calcula el jacobiano $J(i)$, usando la matriz **NR3**.

$$J(i) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X_1} & \frac{\partial f_1}{\partial X_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial X_1} & \frac{\partial f_2}{\partial X_2} \end{bmatrix}_{\vec{X}=\vec{X}(i)}$$

donde:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial X_1} &= \frac{\partial f_1}{\partial E_q} = \frac{1}{R^2 + X^2} [-R E_p \cos \delta + X E_p \sin \delta] \\ \frac{\partial f_2}{\partial X_1} &= \frac{\partial f_2}{\partial E_q} = \frac{1}{R^2 + X^2} [-X E_p \cos \delta - R E_p \sin \delta] \\ \frac{\partial f_1}{\partial X_2} &= \frac{\partial f_1}{\partial \delta} = \frac{1}{R^2 + X^2} [R E_p E_q \sin \delta + X E_p E_q \cos \delta] \\ \frac{\partial f_2}{\partial X_2} &= \frac{\partial f_2}{\partial \delta} = \frac{1}{R^2 + X^2} [X E_p E_q \sin \delta - R E_p E_q \cos \delta] \end{aligned}$$

NR3

En el **paso 3** se resuelve el sistema de ecuaciones lineales mostrado en NR4.

$$J(i) \Delta X_k(i) = \Delta \vec{B}(i)$$

NR4

Finalmente, en el **paso 4** se determinen los nuevos valores de las variables, usando NR5.

$$X_k(i+1) = X_k(i) + \Delta X_k(i)$$

NR5

El criterio de convergencia es el mostrado en la ecuación NR6.

$$\left| \frac{X_k(i+1) - X_k(i)}{X_k(i+1)} \right| < \epsilon$$

NR6

3.9 Potencia, par electromagnético y rendimiento

Medición del par desarrollado por el motor síncrono. Considere el **subtema 3.9 Tema 4**.

Complementos educativos

Tema 3

Aprendizaje basado en problemas

Referencia:

Diseño del complemento:
Problemas 1

“Tema 3” de la asignatura **“Máquinas Eléctricas”**

M. C. José Alejandro Morones Alba
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Problema 1 Capacidad de transmisión

Modelo matemático 1 M1 “Parámetros que afectan el flujo de potencia activa y reactiva”

En la imagen **i**, una línea de transmisión que presenta una reactancia de X_{fase} tiene voltajes E_1 y E_2 en sus extremos. Si se permite que estos voltajes tengan diversas magnitudes o relaciones de fase, se puede representar cualquier tipo de carga que se requiera. Es decir, al establecer E_1 y E_2 con valores arbitrarios y con cualquier ángulo de fase entre ellos, se pueden cubrir todas las posibles condiciones de carga que se presenten. La caída de voltaje a lo largo de la línea se expresa como $E_3 = E_1 - E_2$. Por lo tanto, para una línea que tiene una reactancia X , es posible encontrar la corriente $I_{\text{TR}} = I_{12} = I_{\text{pq}} = I_{\text{Lpq}}$ utilizando la ecuación **i**.

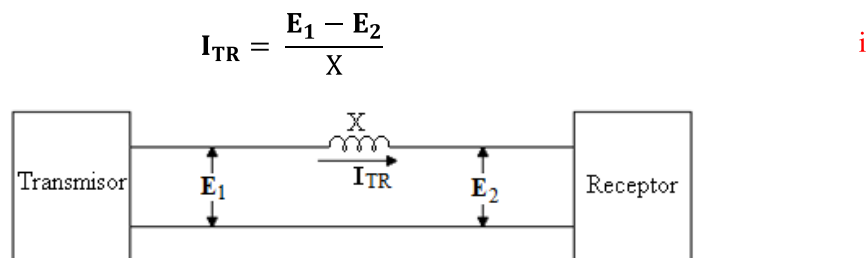


Figura **i** Cálculo de la caída de voltaje a lo largo de la línea y flujos de potencia.

Conocer el valor de E_1 , E_2 y el ángulo de fase entre estas facilita la determinación de la corriente I_{TR} , siempre que se sepa la reactancia X de la línea. Con esta información, es posible calcular tanto la potencia real como la potencia reactiva que la fuente envía y que la carga recibe.

Una línea de transmisión presenta características resistivas y reactivas. En los cálculos que se realizarán a continuación, se considerará que la reactancia es tan predominante en comparación con la resistencia que esta última puede ser considerada irrelevante.

“Caso 1” Cálculo de los flujos de potencia real y reactiva, cuando los voltajes transmisor y receptor son diferentes y están fuera de fase.

Supóngase, por ejemplo, que las propiedades de una línea de transmisión son las siguientes:

Reactancia de la línea por fase = 100Ω

Voltaje transmisor: $E_1 = E_{f1} = 20\text{kV}$ Voltaje receptor: $E_2 = E_{f2} = 30\text{kV}$
El voltaje receptor está atrasado respecto al voltaje transmisor 26.5° .

Solución:

Utilizando la ecuación i, la caída de voltaje E_3 es:

$$E_3 = 15.0359 \angle 117.093 \text{ kV}$$

Y la corriente resulta en:

$$I_{TR} = 150.359 \angle 27.093 \text{ A}$$

La figura ii muestra el diagrama fasorial para esta condición.

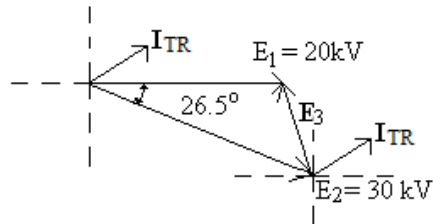


Figura ii Diagrama fasorial, caso i.

Los flujos de potencia son:

Potencia real suministrada por el transmisor =

$$W_1 = (150.359) (20000) \cos (-27.093^\circ) = +2677.186\text{kW}$$

Potencia real absorbida por el receptor =

$$W_2 = (150.359) (30000) \cos (-53.593^\circ) = +2677.186\text{kW}$$

Potencia reactiva suministrada por el transmisor =

$$\text{var}_1 = (150.359) (20000) \sin (-27.093^\circ) = -1369.606\text{kvar}$$

Potencia reactiva absorbida por el receptor =

$$\text{var}_2 = (150.359) (30000) \sin (-53.593^\circ) = -3630.393\text{kvar}$$

Nota: Al calcular el seno y el coseno del ángulo formado entre la corriente y el voltaje, se toma como referencia a la corriente. Debido a esto, dado que E_1 está retrasada respecto a I_{TR} en 27.093° , el ángulo se considera negativo.

Según los resultados obtenidos previamente, si se instalaran wattímetros y varímetros en los extremos del transmisor y el receptor, las lecturas serían las que se presentan en la figura iii. Esto indica que hay una transferencia de potencia activa desde el transmisor hacia el receptor, y como no hay resistencia en la línea, no se produce pérdida durante el trayecto.

No obstante, hay un flujo de potencia reactiva desde el receptor hacia el transmisor, y en este recorrido, se pierden $(-1369.606 + 3630.393) = 2260.787\text{kvar}$ en la línea de transmisión. Se puede verificar esta potencia reactiva usando los kvar de línea $= I^2 X = (150.3952) (100) = 2260.787\text{kvar}$.

Se notará que no es la primera ocasión en que se ha detectado que la potencia real y la potencia reactiva están fluyendo al mismo tiempo, pero en direcciones contrarias.

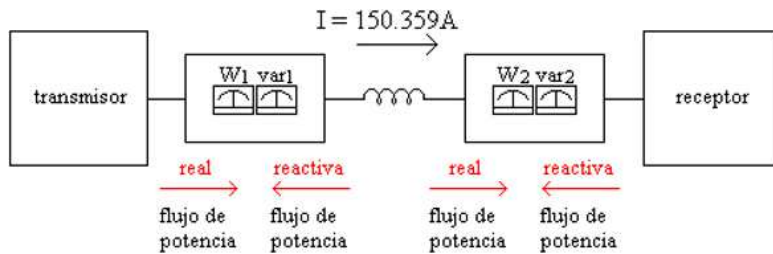


Figura iii Flujos de potencia, caso i.

Conclusión:

- 1 La potencia reactiva fluye del lado de alto voltaje hacia el lado de bajo voltaje.
- 2 La dirección en la que fluye la potencia real va desde el lado con el voltaje que está adelantado hacia el que está atrasado.

“Caso 2” Cálculo de los flujos real y reactiva, cuando los voltajes transmisor y receptor son diferentes pero están en fase.

Cuando los voltajes en el transmisor y el receptor están en fase, pero tienen magnitudes diferentes, fluirá potencia reactiva. Según la conclusión 1, el flujo siempre se moverá del voltaje que es mayor al que es menor.

Supóngase, por ejemplo, que las propiedades de una línea de transmisión son las siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Reactancia de la línea por fase} &= 100\Omega \\ \text{Voltaje transmisor: } E_{t1} &= 30\text{kV} & \text{Voltaje receptor: } E_{r2} &= 20\text{kV} \\ \text{Defasamiento} &0^\circ. \end{aligned}$$

Solución:

Los flujos de potencia son:

$$\begin{aligned} \text{La potencia real suministrada por el extremo transmisor} &= \\ W_1 &= 0\text{W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{La potencia real absorbida por el receptor} &= \\ W_2 &= 0\text{W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{La potencia reactiva suministrada por el extremo transmisor} &= \\ \text{var}_1 &= +3000\text{kvar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{La potencia reactiva absorbida por el receptor} &= \\ \text{var}_2 &= +2000\text{kvar} \end{aligned}$$

La potencia reactiva del transmisor fluye hacia el receptor y, en su camino, la línea de transmisión absorbe 1000kvar. Se puede observar que la energía reactiva fluye del lado de alto voltaje al de bajo voltaje.

Conclusión:

3 Solamente puede fluir potencia real en una línea, si los voltajes del transmisor y receptor están fuera de fase. La dirección del flujo de potencia es del extremo con el voltaje adelantado hacia el atrasado. Una vez más, debe observarse que únicamente se aplica esta regla a las líneas de transmisión que son principalmente reactivas.

4 El desplazamiento de fase entre el transmisor y el receptor se compara a una “torsión” eléctrica, semejante a la torsión mecánica que se presenta cuando una flecha de acero larga envía potencia mecánica a una carga. De hecho, entre mayor sea la “torsión” eléctrica, mayor será el flujo de potencia real. Sin embargo, se encuentra que se alcanza un máximo, cuando el ángulo de fase entre los extremos transmisor y receptor es de 90° . Si el ángulo de fase se incrementa aún más (incrementando la carga), resultará que se envía menos potencia real. En la práctica, es lógico que todo sistema físico está sujeto a ciertos límites para los cuales funcionará o tendrá un funcionamiento normal.

“Caso 3” Cálculo de los flujos de potencia real y reactiva, cuando los voltajes transmisor y receptor son iguales, pero están fuera de fase.

Por último considere el caso:

Reactancia de la línea por fase = 100Ω
Voltaje transmisor: $E_{t1} = 30\text{kV}$ Voltaje receptor: $E_{t2} = 30\text{kV}$
El voltaje receptor está atrasado, respecto al voltaje transmisor, 30° .

Solución:

Los flujos de potencia son:

La potencia real suministrada por el extremo transmisor =
 $W_1 = +4500\text{KW}$

La potencia real absorbida por el receptor =
 $W_2 = +4500\text{KW}$

La potencia reactiva suministrada por el extremo transmisor =
 $\text{var}_1 = +1205.771\text{kvar}$

La potencia reactiva absorbida por el receptor =
 $\text{var}_2 = -1205.771\text{kvar}$

Conclusión:

5 El transmisor entrega tanto potencia activa como reactiva a la línea, y el receptor absorbe potencia activa de ella. Sin embargo, el receptor entrega potencia reactiva a la línea, de modo que

la potencia reactiva total recibida por la línea sea 2411.542kvar. La mitad de la potencia reactiva que la línea absorbe la suministra el transmisor y la otra mitad el receptor. Una vez más, debe observarse que únicamente se aplica esta regla a las líneas de transmisión que son principalmente reactivas. Este ejemplo muestra que un desplazamiento de fase entre los voltajes del transmisor y receptor hace que fluya tanto potencia real como reactiva. Sin embargo, para ángulos menores que 45° , la potencia real es considerablemente mayor que la potencia reactiva.

Modelo matemático 2 M2 “Capacidad de transmisión”

En la práctica, es lógico que todo sistema físico está sujeto a ciertos límites para los cuales funcionará o tendrá un funcionamiento normal. En esta sección se encontrará la máxima capacidad que una cierta línea de transmisión puede transmitir en condiciones estáticas de operación, la cual se denomina como "capacidad de transmisión estática o límite de estabilidad estático".

Considere una línea de transmisión (figura iv) conectado a dos buses p y q, representada por su impedancia $Z = R + j X$. En esta propuesta matemática también se considera la resistencia de la línea.

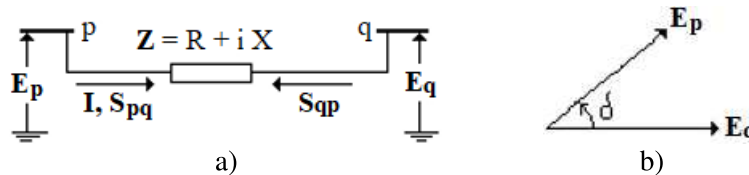


Figura iv Representación por fase de una línea de transmisión.

La corriente que fluye del bus p al bus q es:

$$I_{pq} = \frac{E_p - E_q}{Z} \quad \text{ii}$$

Por definición la potencia compleja es:

$$S = E I^* \quad \text{iii}$$

Sustituyendo ii en iii para S_{pq} y S_{qp} y separando sus partes real o imaginaria resulta:

$$\begin{aligned} P_{pq} &= \frac{1}{R^2 + X^2} (R E_p^2 - R E_p E_q \cos \delta + X E_p E_q \sin \delta) \\ Q_{pq} &= \frac{1}{R^2 + X^2} (X E_p^2 - X E_p E_q \cos \delta - R E_p E_q \sin \delta) \\ P_{qp} &= \frac{1}{R^2 + X^2} (R E_q^2 - R E_p E_q \cos \delta - X E_p E_q \sin \delta) \\ Q_{qp} &= \frac{1}{R^2 + X^2} (X E_q^2 - X E_p E_q \cos \delta + R E_p E_q \sin \delta) \end{aligned} \quad \text{iv}$$

$$\text{Donde: } \delta = \angle E_p - \angle E_q$$

Para tener una idea lo más clara posible se supone que la línea carece de pérdidas reales, es decir que $R = 0\Omega$ lo cual es una característica típica de líneas de transmisión. Con esto las ecuaciones anteriores para la potencia real se convierten en:

$$P_{pq} = -P_{qp} = \frac{E_p E_q \sin \delta}{X} = P_{\max} \sin \delta \quad \text{v}$$

Donde: $P_{\max} = \frac{E_p E_q}{X}$

Y para la potencia reactiva se convierten en:

$$Q_{pq} = \frac{1}{X} (E_p^2 - E_p E_q \cos \delta)$$

$$Q_{qp} = \frac{1}{X} (E_q^2 - E_p E_q \cos \delta) \quad \text{vi}$$

Otra característica de los sistemas eléctricos de potencia es que por razones de diseño $E_p \cong E_q$ con lo cual:

$$P_{\max} = \frac{E^2}{X} \quad \text{vii}$$

Conclusión:

6 De la ecuación v, la única manera de modificar a la potencia transmitida es por una variación del ángulo δ , y también que la máxima potencia que se puede transmitir se logra cuando $\delta = 90^\circ$ el cuál se conoce como “límite de estabilidad estático”, una vez alcanzado este límite cualquier potencia añadida ocasionará que el sistema sea inestable.

7 De la ecuación vi, la única manera de que no se transmita potencia reactiva es considerar que $E_p = E_q$ y que $\delta = 0^\circ$.

8 De la ecuación vii, la potencia transmitida es directamente proporcional al cuadrado del voltaje de transmisión e inversamente proporcional a la reactancia de la línea.

9 Las conclusiones del modelo matemático 1 pueden validarse utilizando las ecuaciones iv obtenidas con el modelo matemático 2.

Problema 2 El generador síncrono

Problema a Las pruebas de vacío y cortocircuito ejecutadas en un generador síncrono trifásico conducen a las tabla i y ii. Determine la reactancia síncrona X_{sff} (use algún proceso de interpolación) para el generador síncrono trifásico para una corriente de campo $I_e = 0.56A$.

Tabla i Prueba de vacío

I_e	E_f
A	V
0	0.65
0.1	32.96
0.2	59.52

Tabla ii Prueba de cortocircuito

I_e	I_{Lcc}
A	A
0	0.02
0.1	0.2
0.2	0.45

0.3	83.77
0.4	101.09
0.5	113.79
0.6	122.57
0.7	128.86
0.8	134
0.9	138.56
1	142.31

0.3	0.65
0.4	0.87
0.5	1.1
0.6	1.32
0.7	1.55
0.8	1.77
0.9	2
1	2.22

Solución:

Calculo de E_f .

$$0.5 \rightarrow 113.79$$

$$0.6 \rightarrow 122.57$$

$$0.6 - 0.5 = 0.1$$

$$122.57 - 113.79 = 8.78$$

$$0.56 - 0.5 = 0.06$$

$$0.1 \rightarrow 8.78$$

$$0.06 \rightarrow \Delta E_f$$

$$\Delta E_f = 5.268V$$

$$E_f = 113.79 + 5.268 = 1.04860569V$$

Calculo de I_{Lcc} .

$$I_{Lcc} = 1.232A$$

Por lo tanto, la reactancia síncrona $X_{s/f}$ es:

$$X_{s/f} = \frac{E_f}{I_{Lcc}} = 96.637\Omega$$

Problema b Se conecta una carga en las terminales de un generador síncrono trifásico cuya impedancia síncrona es $Z_{s/f} = 0 + i90 \Omega$. La tensión aplicada a la carga es $E_f = 120\angle 30^\circ V$ y la impedancia de la carga es $Z_{carga} = 10 - i50 \Omega$. Calcule:

1 La magnitud y fase del voltaje interno E_{of} .

2 El ángulo de potencia δ_m (desplazamiento mecánico).

3 Los flujos de potencia trifásicos W_{13f} , var_{13f} , W_{23f} y var_{23f} . Considerando el **complemento: Problema 1**, ¿En cuál caso cayó el **problema b**?

4 Trace el diagrama fasorial, muestre E_f , I_L , E_{of} y E_3 .

5 Calcule el % de regulación de tensión.

Solución:

1 La corriente en el circuito equivalente es:

$$I_L = \frac{E_f}{Z_{carga}} = 2.353 \angle 108.690^\circ \text{ A}$$

La caída de tensión E_3 en la línea de transmisión es:

$$E_3 = Z_{carga} I_L = 211.805 \angle 161.309^\circ \text{ V}$$

Por lo tanto, el voltaje interno E_{of} es:

$$E_{of} = E_3 + E_f = 97.032 \angle -175.346^\circ \text{ V}$$

2 El desplazamiento mecánico δ_m es:

$$\delta_m = -87.673^\circ$$

3 Los flujos de potencia trifásicos W_{13f} , var_{13f} , W_{23f} y var_{23f} son:

$$W_{13f} = 3 I_L^2 R_{total} = 166.153 \text{ W}$$

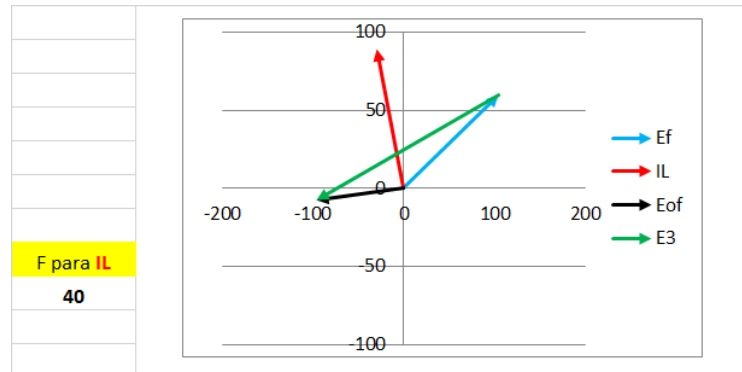
$$W_{23f} = 3 I_L^2 R_{carga} = 664.615 \text{ var}$$

$$\text{var}_{13f} = 3 I_L^2 X_{total} = 166.153 \text{ W}$$

$$\text{var}_{23f} = 3 I_L^2 X_{carga} = -830.769 \text{ var}$$

¿En cuál caso cayó el problema b? **caso 3.**

4 Diagrama fasorial



5 El % de regulación de tensión es:

$$\% \text{ reg ten} = -23.669\%$$

Problema 3 El motor síncrono

El generador síncrono trifásico del **complemento: Problema 2** se hace trabajar como motor síncrono. La tensión de línea aplicada al motor síncrono trifásico es $208\angle 30^\circ \text{ V}$. La potencia activa monofásica que el motor demanda de la red es $W_{11f} = 100 \text{ W}$ y la potencia reactiva monofásica que el motor demanda es $\text{var}_{11f} = 20 \text{ var}$ cuando la corriente de excitación $I_e = 0.84 \text{ A}$.

1 Calcule la reactancia síncrona por fase $X_{s/f}$ (use algún proceso de interpolación).

2 Defina el vector de arranque:

$$X_k(i) = \begin{bmatrix} E_{of} \\ \delta_e \end{bmatrix}$$

3 La resistencia síncrona por fase a $T_1 = 25^\circ \text{C}$ es $R_{s/f} = 10 \Omega$. Corrija la resistencia por efecto de la temperatura a $T_2 = 35^\circ \text{C}$. Aplique el método de Newton Raphson y determine la magnitud y fase del voltaje interno E_{of} . Para el criterio de convergencia considere $\epsilon = 1 \text{E}^{-5}$.

4 Calcule las corrientes I_{Lpq} e I_{Lqp} .

5 Calcule las caídas de tensión E_{3pq} y E_{3qp} .

6 Use el **complemento: Reto 1** y calcule los flujos de potencia monofásicos W_{11f} , var_{11f} , W_{21f} y var_{21f} .

7 Trace el diagrama fasorial, muestre E_{pf} , E_{qf} , I_{Lpq} , I_{Lqp} , E_{3pq} y E_{3qp} .

Solución:

1 La reactancia síncrona por fase es:

$$X_{s/f} = 72.945 \Omega$$

2 El vector de arranque (predicción) es:

δ_e se calcula usando la ecuación **v** con $P_{pq} = 100W$, $E_p = E_q = 120.089V$ y $X = X_{s/f} = 72.945\Omega$.

$$X_k(i) = \begin{bmatrix} E_{of} \\ \delta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 120.089 \\ 0.53 \end{bmatrix}$$

δ_e en radianes

3 Cálculo del voltaje interno E_{of} .

Iteración 1, $i = 0$.

Usando **NR2** se calcula el **paso 1**.

$$\Delta \vec{B}(i) = \begin{bmatrix} -1.802 \\ 7.324 \end{bmatrix}$$

Usando **NR3** se calcula el **paso 2**.

$$J(i) = \begin{bmatrix} 0.618 & 181.105 \\ -1.508 & 74.240 \end{bmatrix}$$

Usando **NR4** se calcula el **paso 3**.

$$\Delta X_k(i) = \begin{bmatrix} -4.577 \\ 0.0057 \end{bmatrix}$$

Finalmente, se calcula el **paso 4** usando **NR5** para determinar los nuevos valores de las variables $\begin{bmatrix} E_{of} \\ \delta_e \end{bmatrix}$.

$$X_k(i+1) = \begin{bmatrix} 120.089 \\ 0.530 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -4.577 \\ 0.0057 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 115.511 \\ 0.536 \end{bmatrix} \quad \text{NR5}$$

Ahora se aplica el criterio de convergencia usando la ecuación **NR6** para las 2 variables.

$$|0.039| < 1E^{-5}$$

$$|0.010| < 1E^{-5}$$

Ninguna variable satisface el criterio de convergencia (las dos variables deben satisfacer para que el proceso iterativo termine). El criterio de convergencia satisface para $i = 2$. Los valores de las variables son:

$$\begin{bmatrix} E_{of} \\ \delta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 115.513 \\ 0.536 \end{bmatrix}$$

$\delta_e = 30.723^\circ$

Por lo tanto, el voltaje interno es:

$$\mathbf{E_{of}} = 115.513 \angle 30.723^\circ \text{ V}$$

4 Las corrientes $\mathbf{I_{Lpq}}$ e $\mathbf{I_{Lqp}}$.

$$\mathbf{I_{Lpq}} = 0.849 \angle -11.309^\circ \text{ V}$$

$$\mathbf{I_{Lqp}} = 0.849 \angle 168.690^\circ \text{ V}$$

5 Las caídas de tensión $\mathbf{E_{3pq}}$ y $\mathbf{E_{3qp}}$.

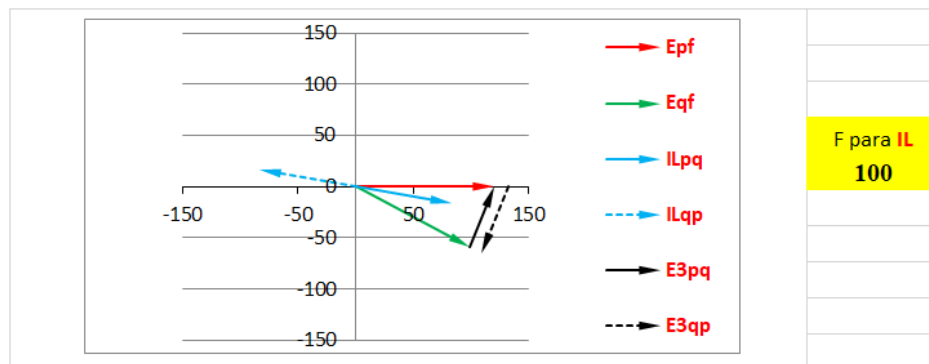
$$\mathbf{E_{3pq}} = 62.568 \angle 70.594^\circ \text{ V}$$

$$\mathbf{E_{of}} = 62.568 \angle 250.594^\circ \text{ V}$$

6 Calculo de los los flujos de potencia monofásicos $\mathbf{W_{11f}}$, $\mathbf{var_{11f}}$, $\mathbf{W_{21f}}$ y $\mathbf{var_{21f}}$.

$\mathbf{W_{11f}}$	$\mathbf{var_{11f}}$	$\mathbf{W_{21f}}$	$\mathbf{var_{11f}}$
$\mathbf{W}$	$\mathbf{var}$	$\mathbf{W}$	$\mathbf{var}$
100	20	92.517	-32.604

7 Diagrama fasorial.



Aprendizaje basado en retos

Referencia:

Diseño del complemento:

Reto 1, 2 y 3

“Tema 3” de la asignatura **“Máquinas Eléctricas”**

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Cualquier herramienta computacional se diseña en términos de un modelo matemático. La frase “analizar la herramienta computacional” se refiere que el profesor debe proponer el modelo matemático en análisis y posteriormente mediante el uso de la herramienta computacional explica que hace, de tal manera que el estudiante tiene una idea certera sobre para que sirve. La frase “construcción de la herramienta computacional” se refiere que el profesor debe proponer el modelo matemático en análisis y posteriormente el estudiante construye la herramienta computacional, obviamente el profesor revisa y corrige (si hubiera errores) el trabajo del estudiante hasta que concreta lo que el profesor ha definido como final.

Reto 1 Construcción de la herramienta computacional “capacidad de transmisión”

Esta herramienta computacional permite:

- Explicar los modelos matemáticos expuestos en el **complemento: Problema 1**. La herramienta computacional debe considerar no solamente los casos ideales sino los casos reales, lo que implica considerar la resistencia R de la línea de transmisión y
- Interpretar las conclusiones expuestas en el **complemento: Problema 1**. Estas conclusiones son solo válidas para casos ideales. Para casos reales debe analizarse detalladamente la herramienta computacional para definir cuantas y cuales conclusiones deben cambiar; es decir, tendrá que proponerse la nueva redacción.

Conducir el experimento práctico de este **complemento: Problema 1** para analizar los **“Caso 1”**, **“Caso 2”** y **“Caso 3”** es prioritario porque permite consolidar las conclusiones para casos reales. Esta herramienta computacional permite comprender claramente cómo construir el **complemento: Reto 2 y 3** e interpretar los resultados de las prácticas de laboratorio expuestas en el **complemento: Práctica 1 y 2**.

La figura v muestra el diseño de la herramienta computacional usando los modelos matemáticos **M1** y **M2** para el **“Caso 3”**: Cálculo de los flujos de potencia real y reactiva, cuando los voltajes transmisor y receptor son iguales, pero están fuera de fase (se proponen tensiones de laboratorio).

				Caso 3								
	EpL								EqL			
	V °								V °			
	150 30								150 0			
	EpF				ZL/f					EqF		
	V °				Ω Ω				V °			
	86.60254038 0				10 100				86.60254038 -30			
M1 →	Ppq1f	Qpq1f	E3pq		E3qp			Pqp1f	Qqp1f			
	W var	V °	V °		V °			W var				
	38.12357373	6.235737343	44.82877361	75	44.82877361	255	36.13385201	-13.66147992				
	Ppq3f	Qpq3f	ILpq		ILqp			Pqp3f	Qqp3f			
	W var	A °	A °		A °			W var				
	114.3707212	18.70721203	0.446062969	-9.289406863	0.446062969	170.7105931	108.401556	-40.98443975				
			PL1f	PL3f	QL1f	QL3f						
			W	W	var	var						
			1.989721726	5.969165178	19.89721726	59.69165178						
M2 →	δ		Ppq1f	Qpq1f	Pqp1f	Qqp1f						
	°		W	var	W	var						
	30		38.12357373	6.235737343	36.13385201	-13.66147992						

Reto 2 Construcción de la herramienta computacional “el generador síncrono”

Esta herramienta computacional resuelve el circuito equivalente del generador síncrono lo que permite analizar y comprender el funcionamiento del generador síncrono.

Para el diseño de esta herramienta computacional se utilizó la máquina síncrona del sistema electromecánico Lab-Volt mostrada en la figura vi.



Figura vi Máquina síncrona del sistema electromecánico Lab-Volt EMS8241.

De la prueba de vacío se obtiene la curva de saturación mostrada en la figura vii.

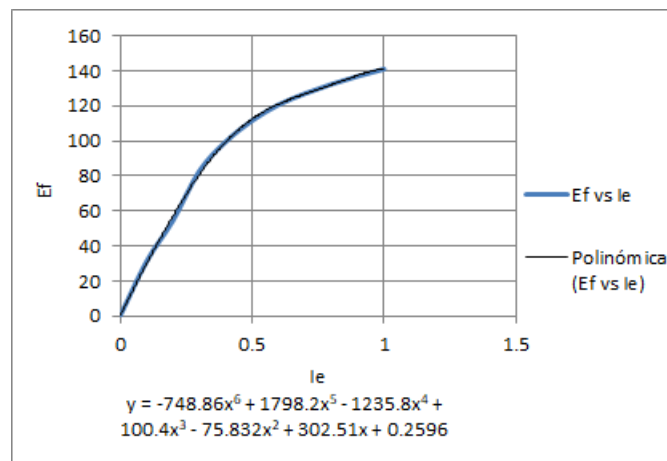


Figura vii Curva de saturación del generador síncrono del sistema electromecánico Lab-Volt. La gráfica muestra un polinomio de orden 6, el polinomio permite obtener valores de E_f (tensión de fase) para valores de I_e (corriente de excitación). $n = 1800\text{rpm}$.

De la prueba de cortocircuito se obtiene característica de cortocircuito mostrada en la figura viii.

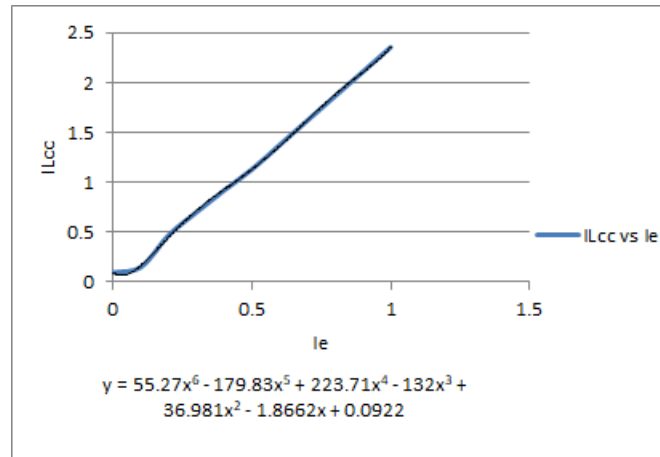


Figura **viii** Característica de cortocircuito del generador síncrono del sistema electromecánico Lab-Volt. La gráfica muestra un polinomio de orden 6, el polinomio permite obtener valores de I_{Lcc} (corriente de línea de cortocircuito) para valores de I_e (corriente de excitación). Esta característica es igual para cualquier velocidad.

La ley de Ohm permite calcular la reactancia síncrona ($X_s = E_f / I_{Lcc}$) del generador síncrono. El valor de la resistencia (R_s) de la impedancia síncrona se calcula utilizando la metodología “**d1**” del **complemento: Práctica 1**. El procedimiento permite proponer la impedancia síncrona Z_L para cualquier valor de I_e a $n = 1800\text{rpm}$. La herramienta computacional considera variación de la resistencia R_s por efecto de la temperatura.

El diseño de la herramienta computacional se muestra en la figura **ix**.

Si se desea analizar el caso 2 ($Z_{carga} = 600 + i0 \Omega$ “carga resistiva”) debe elegirse el caso 2, medir e insertar el nuevo valor de I_e . El experimento se puede conducir manteniendo constante E_f o permitiendo que este voltaje disminuya por efecto de la carga.

El circuito se resuelve así: Se propone una impedancia (Z_{carga}) y puesto que el voltaje en terminales de la máquina se conoce se calcula la corriente de línea I_L , corriente que circula por la impedancia síncrona lo que permite calcular la caída de tensión E_3 en la línea de transmisión. El voltaje E_{of} es la suma fasorial de E_3 y E_f . Los flujos de potencia se calculan usando la ley de ohm ($P = I^2 R$, $Q = I^2 X$) o usando el **complemento: Reto 1**. W_{1lf} , var_{1lf} , E_3 , E_{of} y δ_e son valores que no se pueden medir pero si calcular.

Como se sabe el movimiento medido en grados mecánicos difiere al medido en grados eléctricos, ya que 180° eléctricos representan un movimiento de un polo norte a un polo sur, esto puede ocurrir por ejemplo en 90° mecánicos en una máquina de 4 polos, de ahí que si se desea expresar el ángulo δ_m en grados mecánicos (ángulo de potencia) empleamos la ecuación:

$$\delta_m = (2/p) \delta_e$$

viii

Donde:

p	número de polos
δ_e	ángulo de potencia en grados eléctricos
δ_m	ángulo de potencia en grados mecánicos



Figura ix Herramienta computacional para analizar y comprender el funcionamiento del generador síncrono.

Observación:

- ii La herramienta computacional permite analizar el caso resistivo, inductivo, capacitivo o combinación de cargas.
- iii El ángulo de potencia δm se mide empleando el dispositivo de medición del ángulo de par de torsión mecánico y una luz estroboscópica.
- iv Si se desea medir el ángulo de potencia δm debe reemplazarse la máquina de corriente directa por un motor síncrono con el propósito de que la velocidad de rotación del sistema sea la velocidad síncrona.

Reto 3 Análisis de la herramienta computacional “el motor síncrono”

Esta herramienta computacional resuelve el circuito equivalente del motor síncrono lo que permite analizar y comprender el funcionamiento del motor síncrono.

Para el diseño de esta herramienta computacional se utilizó la máquina síncrona del sistema electromecánico Lab-Volt mostrada en la figura vi y el método de Newton Raphson de los cuatro pasos para resolver el sistema de las ecuaciones iv. La impedancia síncrona se calcula como se mostró en el **complemento: Reto 2** ya que se trata de la misma máquina.

El diseño de la herramienta computacional se muestra en la figura x.

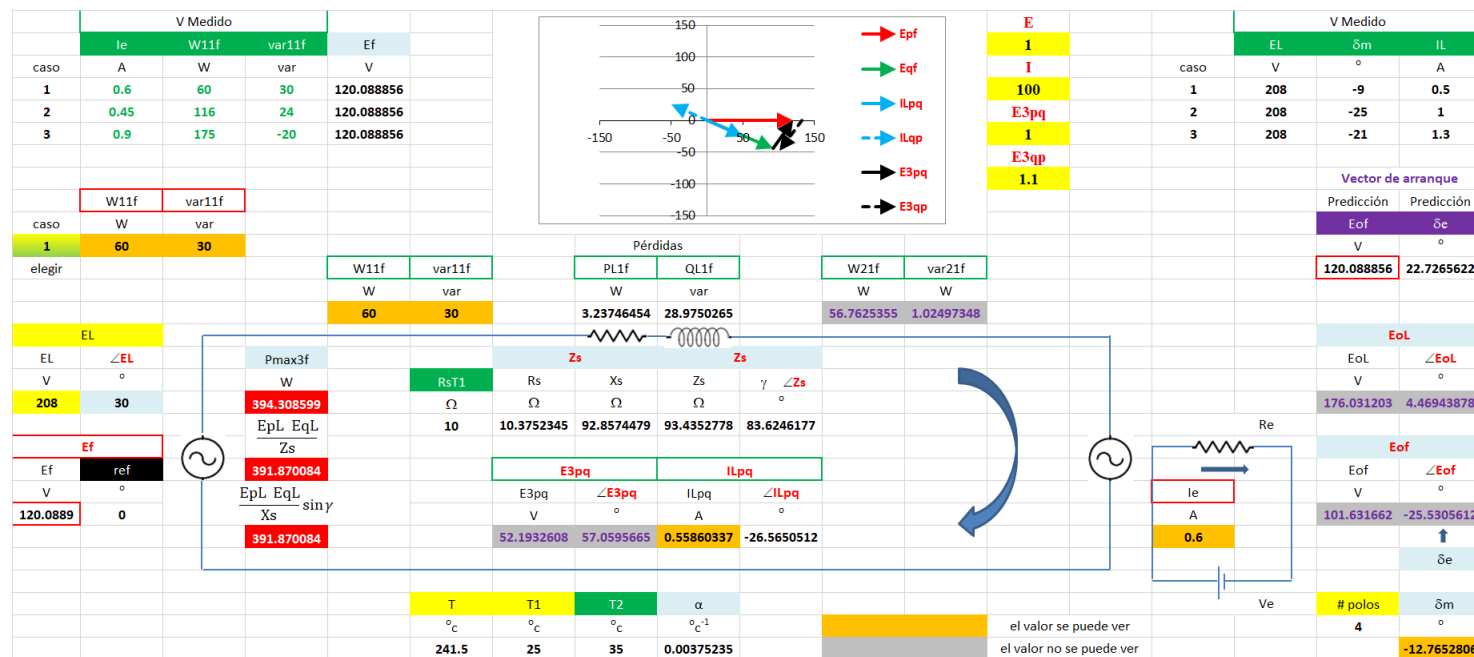


Figura x Herramienta computacional para analizar y comprender el funcionamiento del motor síncrono.

La figura x muestra el comportamiento del motor síncrono como inductancia síncrona, los valores medidos de los flujos de potencia W_{11f} y var_{11f} son positivos. El procedimiento de cálculo inicia proponiendo el vector de arranque (E_{of} y δ_e), E_{of} se iguala con E_f y δ_e se calcula utilizando la ecuación v. La primera iteración aplicando el método de Newton Raphson de los cuatro pasos se muestra en la figura xi. El ángulo de potencia δ_m se calcula usando la ecuación viii.

i	Paso 2		Paso 1		
0	j(i)		$\Delta B(i)$		
1	0.37186604	147.8813095	-0.598739295		
2	-1.231432411	44.65696733	24.22914929		
	Paso 3			Paso 4	
1	1	397.673606960855	-1.61009404138649	$x1(i+1)$	101.9230094
2	0.0000	534.365135884569	22.2464273008278	$x2(i+1)$	0.438284847
			$\Delta E_{of}, \Delta \delta_e$	Criterio de convergencia	
1	1	0	-18.1658466394072	error x1	0.178231066
2	0.0000	1.0000	0.0416	error x2	0.094987335

Figura xi Primera iteración aplicando el método de Newton Raphson de los cuatro pasos.

La solución es para la iteración $i = 4$ resultando que $E_{of} = 102.0455518V$ y $\delta_e = 25.53475749^\circ$. Ahora, empleando el **complemento: Reto 1** y usando el voltaje en terminales de la máquina E_f , el voltaje interno E_{of} y la impedancia síncrona Z_s se calculan los flujos de potencia. Observe como los flujos de potencia calculados (W_{11f} y var_{11f}) coinciden ciento por ciento con los valores medidos (W_{11f} y var_{11f}) lo que implica que la solución es correcta. W_{21f} , var_{21f} , E_3 , E_{of} y δ_e son valores que no se pueden medir pero si calcular.

Rúbrica para evaluar las prácticas de laboratorio

Portada

La portada debe contener:

1. Nombre de la institución
2. Carrera
3. Número y nombre la práctica
4. Nombre de los estudiantes
5. Nombre del profesor
6. Fecha de entrega

En el encabezado aparece mi nombre, esto es así porque un servidor diseño la propuesta. Cuando ustedes envíen su documento deberán quitar mi nombre e incluir el encabezado (si desean incluirlo), pie de página (si desean incluirlo), logotipos (si desean incluirlos).

Objetivos

Incluir los objetivos indicados en la práctica.

Introducción

Lo que se indique en la práctica.

20%

Material y equipo

Incluir la lista indicada en la práctica mencionando las especificaciones técnicas del equipo.

Discusión de resultados:

Al reportar resultados calculados de las prácticas de laboratorio deben utilizar 3 cifras de precisión.

1 Deben respetar la propuesta metodológica de la práctica para mostrar resultados sin tener que repetir la redacción de los procedimientos y sin mostrar los circuitos eléctricos.

30%

2 Deben hacer observaciones (2 o más por objetivo) de los experimentos propuestos en los procedimientos (*esta redacción es en equipo*). Estas observaciones se indican en cada objetivo.

10%

Conclusiones

Deben incluir conclusiones por objetivos y son individuales.

Cada conclusión debe ser redactada en un párrafo de 5 renglones completos (el espaciamento, tamaño y tipo de letra a considerar es: espacio sencillo, 10 arial o times new roman).

La conclusión es una redacción técnica haciendo referencia a la introducción, ecuaciones, cálculos y comportamientos gráficos.

20%

Demostración práctica

Deben redactar en cada objetivo (sin incluir diagramas eléctricos, cálculos, etc) que fue lo que se hizo y que interpretas de la demostración práctica del objetivo (*esta redacción es en equipo*). Cada demostración práctica debe ser redactada en un párrafo de 8 renglones completos (el espaciamento, tamaño y tipo de letra a considerar es: espacio sencillo, 10 arial o times new roman). Esta sección depende de lo que haga un servidor en las demostraciones prácticas ejecutadas en el laboratorio.

20%

Aprendizaje basado en prácticas de laboratorio

Práctica 1

El generador síncrono

Para esta práctica se emplea el **complemento: Reto 1 y 2**.

Objetivos:

- 1 Análisis del generador síncrono elemental.
- 2 Calcular la reactancia síncrona del alternador.
- 3 Cálculo de la regulación de voltaje del alternador.
- 4 Calcular y observar el ángulo de potencia por efecto de la carga.

Introducción:

Cálculo muestra (procedimiento completo a mano) para la carga $R_{lf} = 171.4\Omega$.

Cálculo muestra (procedimiento completo a mano) para la carga $X_{Lf} = 171.4\Omega$.

Cálculo muestra (procedimiento completo a mano) para la carga $X_{Cf} = 171.4\Omega$.

Material y equipo:

Equipo Lab-Volt:

- 2 Módulo de suministro de potencia EMS8821
- 2 Máquina síncrona EMS8241
- 1 Máquina de corriente directa EMS8211
- 1 Interruptor de sincronización EMS8621
- 1 Medidor del ángulo de potencia
- 1 Módulo de resistencia EMS8311
- 1 Módulo de inductancia EMS8321
- 1 Módulo de capacitancia EMS8331

Otros:

- 1 Prototipo “generador elemental de corriente alterna trifásico”
- 3 Galvanómetro
- 3 Multímetro
- 1 Watt-var monofásico o trifásico
- 3 Amperímetro de corriente directa
- 1 Amperímetro de corriente alterna
- 1 Tacómetro
- 1 Luz estroboscópica
- 1 Factorímetro
- 1 Cables

Metodología:

Objetivo 1

a) La figura a muestra un prototipo del generador elemental de corriente alterna trifásico. Coloque los devanados del generador elemental de corriente alterna trifásico 120° desplazados uno con respecto del otro.

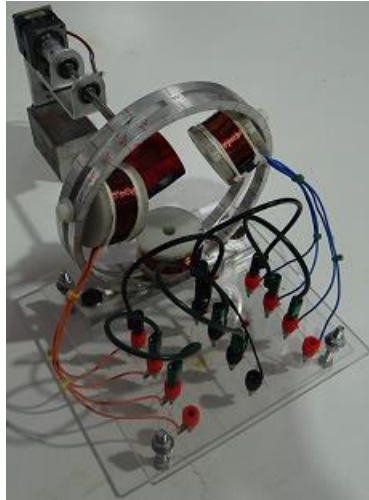


Figura a Prototipo “generador elemental de corriente alterna trifásico”.

b) Conecte al generador elemental 3 galvanómetros para observar el ritmo de las tensiones inducidas como se muestra en la figura b (conecte los galvanómetros al tap 3 “mayor número de vueltas”).

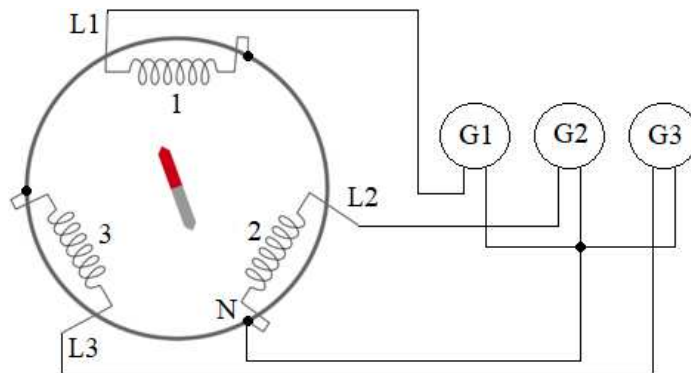


Figura b Conexión de 3 galvanómetros al generador elemental de corriente alterna trifásico.

c) Emplee el motor a pasos mostrado en la figura a (el motor tiene acoplado un imán de neodimio en su eje) y use el **complemento: Práctica 4 Tema 5** para hacer girar el motor a pasos a diferentes velocidades y observe los instrumentos de medición.

Si el motor a pasos gira hacia la derecha, **P1** ¿la secuencia de fases es positiva o negativa? **P2** ¿el defasamiento es 120° ?

Si el motor a pasos gira hacia la izquierda, **P3** ¿la secuencia de fases es positiva o negativa?

Conecte el galvanómetro 2 al tap 2, **P4** ¿la magnitud de esta tensión aumenta o disminuye?

Gire el devanado 2 hacia el devanado 1 y coloquelo a 60° , **P5** ¿el defasamiento entre tensiones es 120° ? **P6** ¿la posición de los devanados define el defasamiento de las tensiones inducidas?

Objetivo 2

d) Conecte el circuito mostrado en la figura c.

Observación:

a Ajuste el reóstato del motor de corriente directa a la resistencia mínima en el momento del arranque (gire la perilla en el sentido de las manecillas del reloj).

b La máquina de corriente directa se opera colocando las escobillas en el plano neutro magnético para evitar chisporroteo, y como consecuencia su posible destrucción.

c El sistema debe estar acoplado mediante una banda.

d Ajuste el reóstato del alternador a su máxima resistencia (moviendo la perilla en el sentido contrario al de las manecillas del reloj).

e Gire la perilla de control del voltaje de corriente directa de la fuente de alimentación en sentido contrario a las manecillas del reloj para iniciar con un voltaje de corriente directa igual a cero.

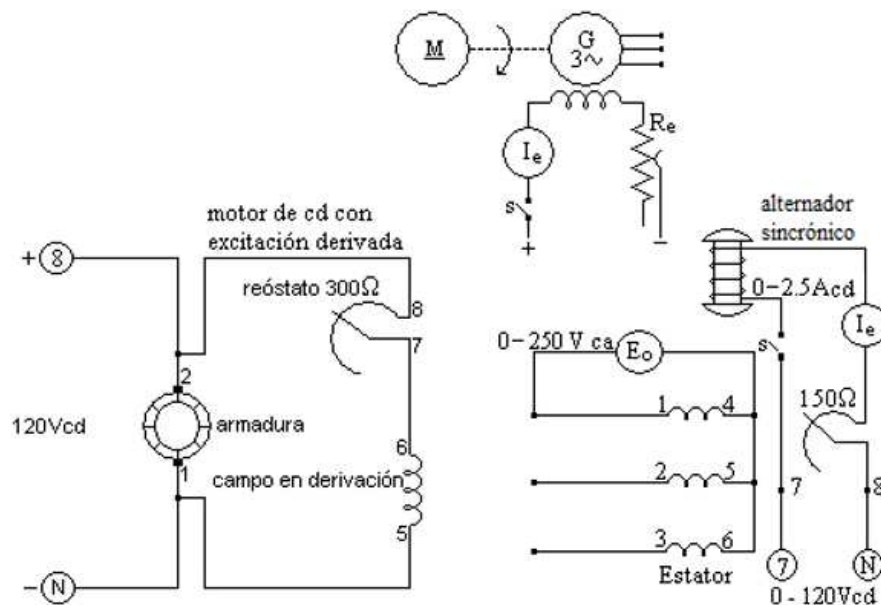


Figura c Prueba de vacío.

Conecte la fuente de alimentación y, usando un tacómetro, ajuste la velocidad del motor de corriente directa a 1800rpm. Durante esta metodología esta velocidad se debe mantener constante.

Haga variar la corriente I_e y observe el efecto sobre el voltaje generado E_f . Tome las lecturas de I_e y E_f y anote los valores en la tabla a.

Grafique la curva de saturación del alternador (voltaje E_f en función de la corriente de excitación I_e , (E_f vs I_e)), muestre la gráfica en la figura d.

Tabla a Valores medidos. Prueba de vacío. $n = 1800\text{rpm}$.

I_e A	$E_o = E_f$ V
0	
0.1	
0.2	
.	
.	
1	

Insertar gráfica

Figura d Curva de saturación del alternador.

P7 ¿Explique por qué el voltaje aumenta con menor rapidez cuando se incrementa la corriente de excitación?

P8 ¿Cuáles serían algunas razones por las que no se debe operar un alternador cerca del codo de su curva de saturación?

Grafique las curvas de vacío para 900, 1800 y 2700rpm (use la figura d).

d1) Use el circuito de la figura c y calcule la resistencia síncrona por fase $R_{s/fase}$.

Mida la resistencia entre devanados del estator es:

$$R_{RS} = \quad \Omega \quad R_{RT} = \quad \Omega \quad R_{ST} = \quad \Omega$$

La resistencia equivalente es la resistencia síncrona por fase $R_{s/fase}$ y se calcula mediante la ecuación I.

$$R_{s/faseT1} = (R_{RS} + R_{RT} + R_{ST}) / 3 \quad \text{I}$$

La resistencia síncrona por fase es entonces $R_{s/fase} = \quad \Omega$

Mida la temperatura ambiente T_1 .

$$T_1 = \quad ^\circ\text{C}$$

e) Conecte el interruptor de sincronización para cortocircuitar el estator del alternador trifásico como se muestra en la figura e.

Considerando que $I_e = 0\text{A}$ y $n = 1800\text{rpm}$ cierre el interruptor de sincronización y mida la corriente I_{Lcc} . Para cada valor de I_e mostrado en la tabla b mida y anote la corriente I_{Lcc} .

Tabla **b** Valores medidos. Preba de corto circuito. n = 1800rpm.

I_c A	I_{Lcc} A
0.1	
0.2	
0.3	
0.4	
0.5	

Insertar gráfica

Si el interruptor de sincronización desconecta y conecta para los valores de I_c indicados en la tabla **b** el grupo motor-generador experimenta esfuerzos mecánicos y en consecuencia desminución de velocidad (lo que implicaría hacer ajustes eventuales de I_f en el devanado de campo del motor de corriente directa). El generador es una carga para el motor que lo impulsa (motor de cd o primomotor). Por otro lado habrá momentáneamente corrientes de gran intensidad en el estator

del alternador y como ya observó, al subsistir el corto circuito, las corrientes intensas disminuirán rápidamente a valores seguros. Para $I_e = 0.4A$ la corriente de estado estable I_{Lcc} supera el dato de placa.

Tabla c Valores calculados de I_{Lcc} . $n = 1800rpm$.

I_e A	I_{Lcc} A
0	valor calculado
0.1	valor medido
0.2	valor medido
0.3	valor medido
0.4	valor medido
0.5	valor medido
0.6	valor calculado
.	valor calculado
1	valor calculado

Usando la ley de Ohm ($X_{s/fase} = E_o/I_{Lcc} \cong X_d$) determine $X_{s/fase}$ para cada valor de I_{Lcc} . Anote los valores en la tabla d.

Observación:

f La $R_{s/fase}$ no debe despreciarse ya que el alternador síncrono disipa potencia.

Tabla d Cálculo de la reactancia síncrona $X_{s/fase}$ del alternador trifásico.

I_e A	$X_{s/fase}$ Ω
0.1	
0.2	
.	
1	

Un alternador tiene menos probabilidades de quemarse cuando está en un corto circuito permanente, que un generador en derivación de corriente directa con excitación independiente. **P9** ¿Explique?

f) Los valores medidos en la metodología "d)" son parcialmente correctos debido a que la velocidad cambia constantemente (situación que puede verificarse usando el tacómetro o la luz estroboscópica). En esta práctica de laboratorio se compararán parámetros medidos con parámetros calculados, por lo que es necesario hacer cambios en el circuito utilizado.

Registre nuevamente los valores de la tabla a (use estos valores para reportar el comportamiento de la figura d, estos valores son los que se usaran a partir del **objetivo 3**) retirando el motor de corriente directa e insertando un motor síncrono que permita operar con una velocidad $n = 1800rpm$.

Haga los ajustes necesarios para recalcular la tabla d.

Objetivo 3

g) Conecte el circuito de la figura **g**. Considere la metodología "**f**": Si el cambio del primomotor no se efectúa será necesario hacer ajustes eventuales en la velocidad; sin embargo, el problema principal de no hacer el cambio es que el ángulo de potencia "no se puede medir".

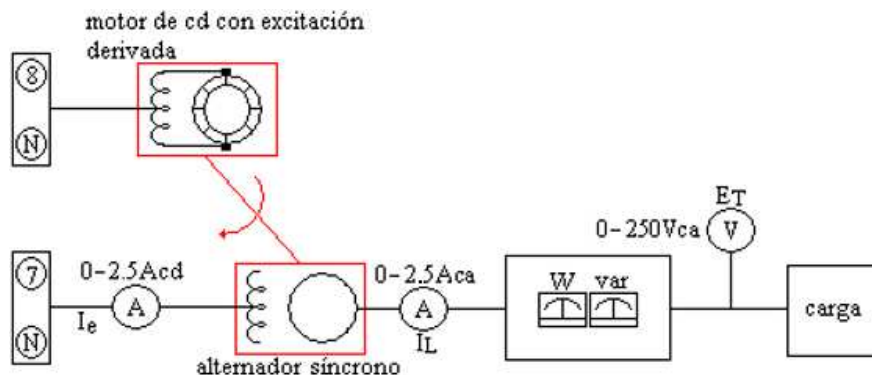


Figura **g** Efecto de varias cargas sobre el voltaje en las terminales del alternador. La figura muestra el diagrama unifilar.

Carga resistiva. Use el **complemento: Reto 2** y registre los valores indicados en la tabla **e** suponiendo valores de I_e de manera que el voltaje $E_f = 120V (\cong E_L = 208V)$ sea constante para cualquier valor de carga (no haga corrección de la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de la temperatura). La $X_{s/fase}$ se determina usando algún proceso de interpolación o determinando los polinomios de las características de vacío y de corto circuito.

Tabla **e** Valores calculados (predicción de valores 1). Carga resistiva. No se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$. $T_1 = T_2 =$ °C.

R_f Ω	I_e A	I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	E_3 V	W_{21f} W	var_{21f} var	fp	δ_m °
1200									
600									
.									
171.4									

Observe los valores calculados de la corriente I_L de la tabla **e** y decida cual(es) de las cargas indicadas deben considerarse para llevar a cabo el experimento. Para la carga considerada mantenga constante el voltaje E_f y anote los valores indicados en la tabla **f**. Asegúrese de mantener balanceada la carga, de modo que todas las fases queden igualmente cargadas. Para los valores de carga propuestos el motor síncrono no pierde estabilidad. Para hacer que el motor síncrono pierda estabilidad incremente la carga hasta que el sistema oscile (en cuanto el sistema oscile desconecte la carga para que el sistema recupere su estabilidad).

Use el **complemento: Reto 2** y el valor de la corriente de excitación I_e de la tabla **f** y registre la reactancia síncrona $X_{s/fase}$ en la tabla **g**. Haga corrección de la resistencia $R_{s/fase}$ por efecto de la temperatura, considere incrementos de temperatura de 5°C cada vez que la carga aumenta e inicie con $T_2 = 25°C$.

Tabla **f** Valores medidos. Carga resistiva.

$E_f = 120V$.

R_f Ω	I_e A	I_L A	W_{21f} W	var_{21f} var	δ_m $^\circ$
1200					
600					
.					
171.4					

Tabla **g** Valores calculados. Carga resistiva. Se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$.

R_f Ω	$R_{s/faseT2}$ Ω	$X_{s/fase}$ Ω
1200		
600		
.		
171.4		

Considere la tabla **g** y registre los valores indicados en la tabla **h**.

Tabla **h** Valores calculados (predicción de valores 2). Carga resistiva. Se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$.

R_f Ω	I_e A	I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	E_3 V	W_{21f} W	var_{21f} var	fp	δ_m $^\circ$
1200									
600									
.									
171.4									

Use el **complemento: Reto 2** para mostrar los diagramas fasoriales (figuras **h** e **i**) para los casos $R_f = 1200$ y 171.4Ω .

Insertar gráfica

Figura **h** Diagrama fasorial para la carga $R_f = 1200\Omega$.

Insertar gráfica

Use el **complemento: Reto 1** para explicar la dirección de los flujos de potencia.

Figura **i** Diagrama fasorial para la carga $R_f = 171.4\Omega$.

En la introducción de la práctica coloque el cálculo muestra para la carga $R_f = 171.4\Omega$.

Compare δ_m de las tablas **f** y **h**. **P10** ¿Explique porque la predicción no coincide con el valor real?

Carga inductiva. Use el **complemento: Reto 2** y registre los valores indicados en la tabla **i** suponiendo valores de I_e de manera que el voltaje $E_f = 120V$ ($\cong E_L = 208V$) sea constante para cualquier valor de carga (no haga corrección de la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de la

temperatura). La $X_{s/fase}$ se determina usando algún proceso de interpolación o determinando los polinomios de las características de vacío y de corto circuito. Considere que la resistencia de la carga R_{carga} es del orden del 10% de la reactancia de la carga X_{carga} .

Tabla i Valores calculados (predicción de valores 1). Carga inductiva. No se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$. $T_1 = T_2 =$ °C.

$X_{C/f}$ Ω	I_e A	I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	E_3 V	W_{21f} W	var_{21f} var	fp	δ_m °
1200									
600									
.									
171.4									

Observe los valores calculados de la corriente I_L de la tabla i y decida cual(es) de las cargas indicadas deben considerarse para llevar a cabo el experimento. Para la carga considerada mantenga constante el voltaje E_f y anote los valores indicados en la tabla j. Asegúrese de mantener balanceada la carga, de modo que todas las fases queden igualmente cargadas.

Tabla j Valores medidos. Carga inductiva.
 $E_f = 120V$.

$X_{C/f}$ Ω	I_e A	I_L A	W_{21f} W	var_{21f} var	δ_m °
1200					
600					
.					
171.4					

Use el **complemento: Reto 2** y el valor de la corriente de excitación I_e de la tabla j y registre la reactancia síncrona $X_{s/fase}$ en la tabla k. Haga corrección de la resistencia $R_{s/fase}$ por efecto de la temperatura, considere incrementos de temperatura de 5°C cada vez que la carga aumenta e inicie con $T_2 = 25^\circ C$.

Tabla k Valores calculados. Carga inductiva. Se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$.

$X_{C/f}$ Ω	$R_{s/faseT2}$ Ω	$X_{s/fase}$ Ω
1200		
600		
.		
171.4		

Considere la tabla k y registre los valores indicados en la tabla l.

Use el **complemento: Reto 2** para mostrar los diagramas fasoriales (figuras j e k) para los casos $X_{C/f} = 1200$ y 171.4Ω .

Tabla 1 Valores calculados (predicción de valores 2). Carga inductiva. Se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$.

$X_{C/f}$ Ω	I_e A	I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	E_3 V	W_{21f} W	var_{21f} var	fp	δ_m °
1200									
600									
.									
171.4									

Insertar gráfica

Figura j Diagrama fasorial para la carga $X_{L/f} = 1200\Omega$.

Insertar gráfica

Use el **complemento: Reto 1** para explicar la dirección de los flujos de potencia.

Figura k Diagrama fasorial para la carga $X_{L/f} = 171.4\Omega$.

En la introducción de la práctica coloque el cálculo muestra para la carga $X_{L/f} = 171.4\Omega$.

Carga capacitiva. Use el **complemento: Reto 2** y registre los valores indicados en la tabla m suponiendo valores de I_e de manera que el voltaje $E_f = 120V$ ($\cong E_L = 208V$) sea constante para cualquier valor de carga (no haga corrección de la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de la temperatura). La $X_{s/fase}$ se determina usando algún proceso de interpolación o determinando los polinomios de las características de vacío y de corto circuito. Considere que la resistencia de la carga R_{carga} es del orden del 1% de la reactancia de la carga X_{carga} .

Tabla m Valores calculados (predicción de valores 1). Carga capacitiva. No se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$. $T_1 = T_2 =$ °C.

$X_{L/f}$ Ω	I_e A	I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	E_3 V	W_{21f} W	var_{21f} var	fp	δ_m °
1200									
600									
.									
171.4									

Observe los valores calculados de la corriente I_L de la tabla m y decida cual(es) de las cargas indicadas deben considerarse para llevar a cabo el experimento. Para la carga considerada mantenga constante el voltaje E_f y anote los valores indicados en la tabla n. Asegúrese de mantener balanceada la carga, de modo que todas las fases queden igualmente cargadas.

Use el **complemento: Reto 2** y el valor de la corriente de excitación I_e de la tabla n y registre la reactancia síncrona $X_{s/fase}$ en la tabla o. Haga corrección de la resistencia $R_{s/fase}$ por efecto de la temperatura, considere incrementos de temperatura de 5°C cada vez que la carga aumenta e inicie con $T_2 = 25^\circ C$.

Tabla **n** Valores medidos. Carga capacitiva.

$E_f = 120V$.

$X_{L/f}$ Ω	I_e A	I_L A	W_{21f} W	var_{21f} var	δ_m °
1200					
600					
.					
171.4					

Tabla **o** Valores calculados. Carga capacitiva. Se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$.

$X_{L/f}$ Ω	$R_{s/faseT2}$ Ω	$X_{s/fase}$ Ω
1200		
600		
.		
171.4		

Considere la tabla **o** y registre los valores indicados en la tabla **p**.

Tabla **p** Valores calculados (predicción de valores 2). Carga capacitiva. Se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$.

$X_{L/f}$ Ω	I_e A	I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	E_3 V	W_{21f} W	var_{21f} var	fp	δ_m °
1200									
600									
.									
171.4									

Use el **complemento: Reto 2** para mostrar los diagramas fasoriales (figuras **l** e **m**) para los casos $X_{L/f} = 1200$ y 171.4Ω .

Insertar gráfica

Figura **l** Diagrama fasorial para la carga $X_{C/f} = 1200\Omega$.

Insertar gráfica

Use el **complemento: Reto 1** para explicar la dirección de los flujos de potencia.

Figura **m** Diagrama fasorial para la carga $X_{C/f} = 171.4\Omega$.

En la introducción de la práctica coloque el cálculo muestra para la carga $X_{C/f} = 171.4\Omega$.

h) Para la carga resistiva, inductiva y capacitiva calcule el % de regulación de voltaje, registre los valores en la tabla **q**, use las tablas **h**, **l** y **p** (predicción de valores 2).

Tabla q % de regulación de voltaje.

R_{f}	Carga resistiva		
	E_f (V)	E_{of}	% reg vol
1200			
171.4			
$X_{L/f}$	Carga inductiva		
	E_f (V)	E_{of}	% reg vol
1200			
171.4			
$X_{C/f}$	Carga capacitiva		
	E_f (V)	E_{of}	% reg vol
1200			
171.4			

Objetivo 4

i) Se incluyó en la metodología “g”.

Sugerencias didácticas:

Sin importar el tipo de carga el motor síncrono debe operar como resistencia síncrona durante toda la práctica de laboratorio.

No se hace corrección por efecto de temperatura en la resistencia de la carga puesto que permanece conectada por un tiempo pequeño.

La metodología “g” puede proceder permitiendo que el voltaje disminuya (para cargas resistivas o inductivas) o aumente (para cargas capacitivas) por efecto de la carga lo que implica que $X_{s/fase}$ sea constante durante el experimento ya que I_c no cambia. La $R_{s/fase}$ si cambia puesto que sufre incrementos por efecto de temperatura.

En la metodología “g” use la luz estroboscópica y el medidor del ángulo de potencia para medir el ángulo de potencia. Una velocidad de 1800rpm corresponde a 30rps, lo que permite que la frecuencia de disparo de la luz estroboscópica sea de 30Hz. Se debe poner el interruptor de frecuencia en “1/2f” y el interruptor de disparo en la posición “INT” para que la intermitencia de la luz estroboscópica sea 60/2=30 destellos por segundo.

Construir el **complemento: Reto 1** para calcular y predecir la dirección de los flujos de potencia en una línea de transmisión es importante porque permite analizar los modelos matemáticos propuestos por el profesor y aplicarlos satisfactoriamente a la práctica de laboratorio. La herramienta computacional ofrece resultados al instante (datos, cálculos y diagramas vectoriales), permitiendo discutir con el alumno para que se apodere del conocimiento. Esta herramienta computacional es base construir el **complemento: Reto 2**.

Construir el **complemento: Reto 2** para analizar el funcionamiento del generador síncrono es importante porque permite analizar el modelo matemático propuesto por el profesor y aplicarlo satisfactoriamente a la práctica de laboratorio. La herramienta computacional ofrece resultados al

instante (datos, cálculos, gráficas y diagramas vectoriales), lo que permite discutir al momento con el alumno para que se apodere del conocimiento. La herramienta computacional predice todos y cada uno de los valores que deben medirse en las metodologías de la práctica de laboratorio, lo que permite cuidar la integridad de los equipos utilizados para no superar los valores nominales especificados por el fabricante.

Reporte del equipo:

Ver la rúbrica para evaluar prácticas de laboratorio.

Referencias:

Diseño del complemento:

Práctica 1 y 2

“Tema 3” de la asignatura **“Máquinas Eléctricas”**

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del

Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Experimento de laboratorio No. 56 “El alternador trifásico”

y 57 “El alternador con carga”:

Experimentos base para el diseño del complemento: Práctica 1

EXPERIMENTOS CON EQUIPO ELÉCTRICO

Theodore Wildi, Michael J. De Vito

Editorial Limusa, México. 1975

Lab-Volt, Sistemas Educativos

Práctica 2

El motor síncrono

Para esta práctica se emplea el **complemento: Reto 1 y 3**.

Objetivo:

- 1 Analizar el modelado matemático para predecir el comportamiento del motor síncrono.

Introducción:

Investigue 3 aplicaciones del motor síncrono.

Muestre los cálculos (a mano) de las tablas **b-e** (1/3 de Pm).

Material y equipo:

Equipo Lab-Volt:

- 2 Módulo de suministro de potencia EMS8821
- 1 Máquina síncrona EMS8241
- 1 Electrodinamómetro EMS8911

Otros:

- 2 Multímetro
- 1 Wattmetro-varmetro
- 1 Amperímetro de corriente directa
- 1 Amperímetro de corriente alterna
- Cables

Metodología:

Objetivo 1

- a)** Conecte el circuito mostrado en la figura **a**.

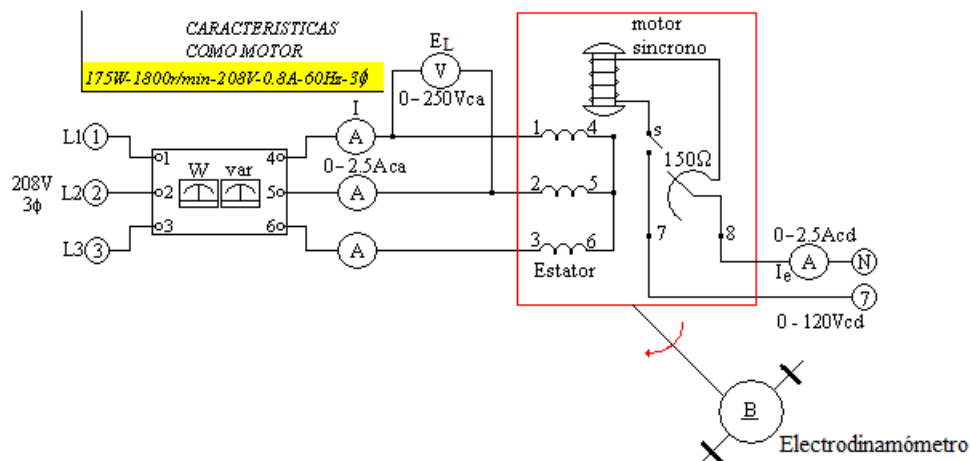


Figura **a** Motor síncrono bajo carga.

Ajuste el par en el electrodinamómetro para que el motor síncrono desarrolle 58.333W (1/3 de Pm) y defina la condición de operación que desee. Registre los valores indicados en la tabla a.

Tabla a Valores medidos. Motor síncrono bajo carga (1/3 de Pm).

$I_e =$ A, $E_L = 208V$				
I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	δ_m °	Condición de operación

Tire la carga y desenergice el circuito.

b) Cálculos.

b1) Use las características de corto circuito y vacío obtenidas en el **complemento: Práctica 1** para determinar X_s . El valor de X_s se determina para el valor de I_e registrado en la tabla a. Considere el valor de R_s obtenido en el **complemento: Práctica 1** y refiera el valor a una temperatura de 35 °C. Registre en la tabla b los valores calculados X_s y R_s .

Tabla b Valores calculados. Motor síncrono bajo carga (1/3 de Pm).

$R_{s35^\circ C} (\Omega)$	$X_s (\Omega)$

Para el vector de arranque:

b2) Considere que el voltaje inducido es igual al voltaje en terminales.

b3) Use la ecuación v del **complemento: Problema 1** para predecir δ_e y registre el valor en la tabla c. δ_e debe calcularse utilizando el valor correspondiente de la tabla a y las metodologías “b1)” y “b2)”.

Tabla c Valor calculado (predicción). Motor síncrono bajo carga (1/3 de Pm).

$E_{oL} = E_L = 208V$	
$\delta_e (^\circ)$	

b4) Use el **complemento: Reto 1** empleando el vector de arranque para calcular W_{11f} y var_{11f} . Como puede ver estos flujos de potencia no son iguales a los medidos de la tabla a. La razón de esto es porque el voltaje inducido E_{oL} no es de ninguna manera el voltaje en terminales del motor E_L . Además, la ecuación v considera que la resistencia R_s es cero, lo que implica que el ángulo δ_e sea una aproximación al valor exacto. Registre los valores indicados en la tabla d.

Tabla d Valores calculados (predicción). Motor síncrono bajo carga (1/3 de Pm).

$E_{oL} = E_L = 208V$		
$\delta_e (^\circ)$	$W_{11f} (W)$	$var_{11f} (W)$

- b5)** Use el método de Newton Raphson descrito en el **subtema 3.8** para calcular el valor exacto del voltaje interno $E_o = E_o \angle \delta_e$. Para verificar que el valor exacto del voltaje interno es correcto vuelva a utilizar el **complemento: Reto 1**. Registre los valores indicados en la tabla **e**.

Tabla **e** Valores calculados (valores exactos). Motor síncrono bajo carga (1/3 de Pm).

$I_e =$ A, $E_L = 208V$			
E_{of} V			
E_{of}		$\angle \delta_e$	

I_L A		E_3 V	
I_L	°	E_3	°

W_{11f} W	var_{11f} var	W_{21f} W	var_{21f} var

δ_m (°)

- b6)** Use el **complemento: Reto 3** y muestre el diagrama fasorial del motor síncrono para la condición de operación analizada (figura **b**).

Insertar figura

Use el **complemento: Reto 1** para explicar la dirección de los flujos de potencia.
Figura **b** Diagrama fasorial del motor síncrono (1/3 de Pm).

- c)** Repita las metodologías “**a)**” y “**b)**” para que el motor síncrono desarrolle 116.666W (2/3 de Pm). Elija la condición de operación.

Tabla **f** Valores medidos. Motor síncrono bajo carga (2/3 de Pm).

$I_e =$ A, $E_L = 208V$				
I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	δ_m °	Condición de operación

Tabla **g** Valores calculados. Motor síncrono bajo carga (2/3 de Pm).

$R_{s35^\circ C}$ (Ω)	X_s (Ω)

Tabla **h** Valor calculado (predicción). Motor síncrono bajo carga (2/3 de Pm).

$$E_{oL} = E_L = 208V$$

δ_e (°)

Tabla **i** Valores calculados (predicción). Motor síncrono bajo carga (2/3 de Pm).

$$E_{oL} = E_L = 208V$$

δ_e °	W_{11f} W	var_{11f} var

Tabla **j** Valores calculados (valores exactos). Motor síncrono bajo carga (2/3 de Pm).

$$I_e = \quad A, E_L = 208V$$

E_{of} V	
E_{of}	$\angle \delta_e$

I_L A		E_3 V	
I_L	°	E_3	°

W_{11f} W	var_{11f} var	W_{21f} W	var_{21f} var

δ_m (°)

Insertar figura

Use el **complemento: Reto 1** para explicar la dirección de los flujos de potencia.

Figura **c** Diagrama fasorial del motor síncrono (2/3 de Pm).

d) Repita las metodologías “**a)**” y “**b)**” para que el motor síncrono desarrolle 175W (3/3 de Pm). Elija la condición de operación.

Tabla **k** Valores medidos. Motor síncrono bajo carga (3/3 de Pm).

$$I_e = \quad A, E_L = 208V$$

I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	δ_m °	Condición de operación

Tabla **l** Valores calculados. Motor síncrono bajo carga (3/3 de Pm).

$R_{s35^\circ C}$ (Ω)	X_s (Ω)

Tabla m Valor calculado (predicción). Motor síncrono bajo carga (3/3 de Pm).

$$E_{oL} = E_L = 208V$$

δ_e (°)

Tabla n Valores calculados (predicción). Motor síncrono bajo carga (3/3 de Pm).

$$E_{oL} = E_L = 208V$$

δ_e °	W_{11f} W	var_{11f} var

Tabla o Valores calculados (valores exactos). Motor síncrono bajo carga (3/3 de Pm).

$$I_e = A, E_L = 208 V$$

E_{of} V	
E_{of}	$\angle \delta_e$

I_L A	E_3 V
I_L	E_3

W_{11f} W	var_{11f} var	W_{21f} W	var_{21f} var

δ_m °

Insertar figura

Use el **complemento: Reto 1** para explicar la dirección de los flujos de potencia.

Figura d Diagrama fasorial del motor síncrono (3/3 de Pm).

Sugerencias didácticas:

Construir el **complemento: Reto 1** para calcular y predecir la dirección de los flujos de potencia en una línea de transmisión es importante porque permite analizar los modelos matemáticos propuestos por el profesor y aplicarlos satisfactoriamente a la práctica de laboratorio. La herramienta computacional ofrece resultados al instante (datos, cálculos y diagramas vectoriales), permitiendo discutir con el alumno para que se apodere del conocimiento. Esta herramienta computacional es base construir el **complemento: Reto 3**.

Analizar el **complemento: reto 3** para comprender el funcionamiento del motor síncrono es importante porque permite analizar los modelos matemáticos propuestos por el profesor y

aplicarlo satisfactoriamente a la práctica de laboratorio. La herramienta computacional ofrece resultados al instante (datos, cálculos, gráficas y diagramas vectoriales), lo que permite discutir al momento con el alumno para que se apodere del conocimiento. La herramienta computacional predice todos y cada uno de los valores que deben medirse en las metodologías de la práctica de laboratorio, lo que permite cuidar la integridad de los equipos utilizados para no superar los valores nominales especificados por el fabricante.

Antes de ejecutar la práctica 2 primero conduzca el experimento inicial.

Experimento inicial:

El motor síncrono y el electrodinamómetro

- Objetivos:**
- 1 Análisis del arranque del motor síncrono y
 - 2 Cálculo de la potencia mecánica desarrollada.

Material y equipo necesario:

Equipo Lab-Volt:

- 1 Módulo de suministro de potencia EMS8821
- 1 Motor/generador síncrono EMS8241
- 1 Electrodinamómetro EMS8911

Otros:

- 1 Factorímetro
- 1 Wattmetro-varmetro
- 1 Amperímetro de corriente alterna
- 1 Amperímetro de corriente directa
- 1 Tacómetro
- 1 Banda
- Cables

Metodología:

Objetivo 1

- a)** Examine el motor/generador síncrono (máquina sincrónica) Lab-Volt.

Los devanados del estator numerados 1-4, 2-5 y 3-6 son iguales y se encuentran en la parte estacionaria del motor, conocida como estator. Estos devanados reciben corriente alterna y están conectados a una fuente de energía trifásica. Por otro lado, el devanado del rotor, que es la parte que gira del motor, se une a las terminales 7-8 mediante un reóstato de 150Ω . Este devanado utiliza corriente directa, y su cantidad se puede regular a través del reóstato. Algunos motores síncronos incluyen un interruptor de presión que se instala en este devanado.

Conecte el circuito mostrado en la figura **b**.

Ajuste el reóstato a su máxima resistencia (sentido contrario al de las manecillas del reloj) y asegurese de que el interruptor s esté abierto.

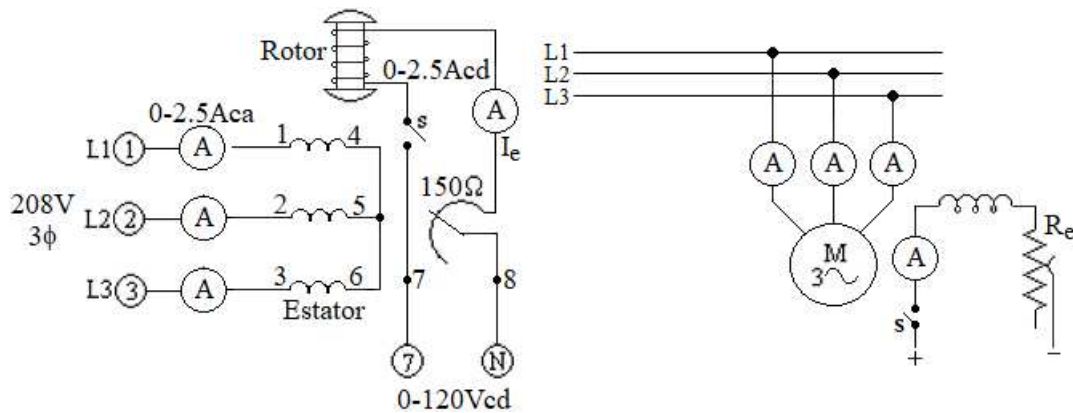


Figura b Conexión del motor síncrono.

Energice el estator con un voltaje $E_L = 208Vca$ y observe los amperímetros conectados al estator. Durante la fase de arranque es una buena costumbre corto-circuitar las bobinas de los amperímetros por medio de un cable que será posteriormente removido una vez que el arranque ha ocurrido. Considerando que la $Z_{s/fase}$ es la misma para cualquiera de las tres fases no se requieren 3 amperímetros.

Observación:

1 El rotor de la máquina síncrona porta además la jaula de ardilla, por lo que al energizar el estator la máquina arranca como un motor de inducción jaula de ardilla.

Cierre el interruptor s , energice el devanado de campo con un voltaje de $E = 120Vcd$ y observe los amperímetros conectados al estator.

Observación:

2 El motor síncrono se alimenta de cd solo cuando el interruptor s está cerrado.

P1 ¿Porqué el devanado de campo de la máquina síncrona debe operar con corriente directa?

Las corrientes en el estator son las máximas. El motor se comporta como un inductor o inductancia síncrona. Conecte un factorímetro y un watt-var monofásico o trifásico para validar el modo de operación. Mida las corrientes de línea y anote los resultados en la tabla **p**.

3 Al conectar el factorímetro y el watt-var al circuito debe abrir el interruptor s para un arranque futuro. Cuando la máquina opera como una inductancia deberá registrarse un factor de potencia inductivo y deberá demandar un pequeño valor de potencia activa $+P$ (ya que la máquina opera en vacío) y demandar un determinado valor de potencia reactiva $+Q$.

P2 ¿Cuál es su predicción si el arranque se efectúa con el interruptor s cerrado?

Tabla **p** Valores medidos. Inductancia síncrona.

Mínima corriente de excitación $I_e =$ A.

I_{L1} (A)	I_{L2} (A)	I_{L3} (A)

Use un tacómetro para medir la velocidad del grupo motor-freno. $n_{\text{bajoexcitada}} =$ rpm

Observación:

4 Aún cuando las corrientes de línea son las mas grandes son más pequeñas comparadas cuando el interruptor **s** está abierto. Las corrientes de línea son más grandes cuando la máquina opera como motor de inducción.

Gire la perilla de control del reóstato del devanado de campo para obtener la **mínima corriente de línea I_L (corriente por el estator)**, según lo indiquen los tres medidores de corriente (el motor se comporta como una resistencia síncrona). Mida las corrientes de línea I_L y anote los resultados en la tabla **q**.

Tabla **q** Valores medidos. Resistencia síncrona.

Corriente de excitación normal, $I_e =$ A.

I_{L1} (A)	I_{L2} (A)	I_{L3} (A)

Use un tacómetro para medir la velocidad del grupo motor-freno. $n_{\text{excitación normal}} =$ rpm

Observación:

5 Cuando la máquina opera como una resistencia síncrona deberá registrarse un factor de potencia unitario y deberá demandar solo potencia activa +P ($Q=0$).

6 Como puede observarse, el factor de potencia de la máquina puede cambiar modificando la excitación de cd en el rotor o corriente de excitación por el devanado de campo.

Aumente la excitación de cd del rotor ajustando el reóstato a la mínima resistencia (la perilla de control deberá estar en su posición extrema en el sentido de las manecillas del reloj).

Las corrientes en el estator son las máximas. El motor se comporta como un capacitor o capacitancia síncrona. Mida las corrientes de línea I_L y anote los resultados en la tabla **r**.

Tabla **r** Valores medidos. Capacitancia síncrona.

Máxima corriente de excitación $I_e =$ A.

I_{L1} (A)	I_{L2} (A)	I_{L3} (A)

Use un tacómetro para medir la velocidad del frupo motor-freno. $n_{\text{sobreexcitada}} =$ rpm

Observación:

7 Si el motor síncrono opera como un condensador síncrono entonces deberá demandar un pequeño valor de potencia activa +P (ya que la máquina opera en vacío) y entregar a la fuente de alimentación un determinado valor de potencia reactiva -Q.

8 Cuando la máquina sincrónica opere por debajo de la corriente de excitación normal usaremos el término "bajoexcitada" y cuando opere por encima de la corriente de excitación normal usaremos el término "sobreexcitada".

P3 ¿Se mantiene constante la velocidad para cualquier valor de corriente de excitación?

Reduzca la corriente de excitación I_e hasta que las corrientes del estator I_L lleguen a sus valores mínimos.

Compruebe si el sentido de rotación es igual o contrario al de las manecillas del reloj.

Rotación =

Desenergice el sistema e intercambie dos fases. Energice el sistema y verifique el sentido de rotación (recuerde que la máquina se arranca como motor de inducción y posteriormente se sincroniza).

Rotación =

Desconecte la fuente de energía e intercambie las dos fases que cambió. Para la metodología "**b**" el sentido de rotación del motor síncrono debe ser horario.

Objetivo 2

b) Examine el electrodinamómetro Lab-Volt. Conecte el electrodinamómetro a las salidas 1 y N de la fuente de alimentación, $E = 120Vca$. Como puede observarse, este es un voltaje de fase. El electrodinamómetro posee un puente rectificador localizado en la parte posterior del módulo, el cual proporciona la energía de cd para el campo magnético del estator.

Debido a las consideraciones de diseño del electrodinamómetro se debe cuidar el sentido de rotación del mismo. El par del electrodinamómetro se puede medir sólo cuando gira en la misma dirección que las manecillas del reloj.

Acople el motor síncrono y el electrodinamómetro por medio de una banda. Además, ajuste la perilla de control del electrodinamómetro (autotransformador variable) a su posición extrema en sentido contrario al de las manecillas del reloj (para proporcionar una carga mínima en el arranque del motor).

Energice el sistema y verifique que la corriente de excitación I_e sea la corriente de excitación normal (recuerde que para esta corriente la máquina opera como una resistencia síncrona), aumente la carga del motor (acción frenado del electrodinamómetro) haciendo girar la perilla de control del electrodinamómetro hasta que la escala marcada en la carcasa del estator indique 9 lb·ft·plg (el número 9 debe estar directamente debajo de la línea vertical color rojo en la ventanilla que está debajo de la polea). Mida las corrientes de línea I_L y anote los resultados en la tabla **s**.

Tabla s Valores medidos. $\tau = 9\text{lb}_f\text{-plg}$.

I_{L1} (A)	I_{L2} (A)	I_{L3} (A)

Use un tacómetro para medir la velocidad del grupo motor-freno. $n_{\text{excitación normal}} =$ rpm

Haga variar la corriente de excitación I_e , haciendo girar la perilla de control del reóstato en tanto que se conserva la carga de $9\text{lb}_f\text{-plg}$ **P4** ¿Qué efecto se produce en las tres corrientes del estator cuando varía la excitación de cd? **P5** ¿El ángulo de potencia cambia?

Mida la velocidad del motor a las excitaciones máxima y mínima de cd cuando se tiene la misma carga de $9\text{lb}_f\text{-plg}$.

$n_{\text{excitación mínima}} =$ rpm

$n_{\text{excitación máxima}} =$ rpm

P6 ¿Pierde sincronismo el motor cuando la excitación de cd es demasiado baja?

P7 ¿Cuál sería su predicción si $I_e = 0\text{A}$?

Calcule los caballos de potencia que desarrolló el motor síncrono para $\tau = 9\text{lb}_f\text{-plg}$.

$hp_{\tau = 9\text{lb}_f\text{-plg}} =$ caballos de potencia

Recuerde que las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio de esta máquina son $1/4\text{Hp}$, 1800rpm , $120/208\text{V}$, 3ϕ .

Aumente la excitación de cd a su valor máximo. Aumente gradualmente la carga del motor síncrono haciendo girar la perilla de control del electrodinamómetro hasta que el motor síncrono pierda sincronismo (cuando la máquina pierda sincronismo desconecte inmediatamente la fuente de energía o tire carga).

τ de ruptura = $\tau_{\text{ruptura}} =$ $\text{lb}_f\text{-plg}$

Calcule los caballos de potencia que desarrolló el motor síncrono para el τ de ruptura (inmediatamente antes de la ruptura).

$hp_{\tau \text{ de ruptura}} =$ caballos de potencia

P8 ¿Es posible modificar la potencia de salida P_m de un motor síncrono? **P9** ¿Explique?

Sugerencias didácticas del experimento inicial:

Para la metodología "**a**"). El devanado de campo del motor síncrono se aplica solo cuando la máquina ha alcanzado su velocidad; es decir, la máquina debe arrancarse como motor de inducción. La máquina síncrona de rotor cilíndrico tiene un par-motor de arranque "nulo" y

requiere de un sistema auxiliar que la lleve a su velocidad de sincronismo o próximo a ella (el motor se acelera cuando se aplica la potencia trifásica de ca al estator, debido al devanado de jaula de ardilla que está empotrado en los polos).

Para la metodología "**b**". Para aumentar la potencia de salida (sobrecarga) de un motor síncrono la excitación de cd debe ser la máxima. El campo magnético en el rotor aumenta su fuerza, causando una mayor atracción entre los polos del rotor y estator, incrementándose el par.

Una característica muy especial hace que los motores síncronos sean útiles en las aplicaciones industriales donde se emplean muchos motores de inducción. Si al rotor de un motor síncrono le suministra más corriente de cd que la requerida, se dice que el motor está sobreexcitado, y tomará una corriente de fase-adelantado de la línea de potencia, como un capacitor conectado a la línea.

En el caso de transformadores y motores de inducción, las corrientes tomadas tienden a atrasarse al voltaje aplicado. Mientras más grande el atraso, más bajo es el factor de potencia. Podemos mejorar el factor de potencia, añadiendo capacitancia a los circuitos de carga. Así llega a ser práctico reemplazar los motores de inducción en algunas máquinas de alguna planta, con motores síncronos, los cuales mejoran el factor de potencia, mientras suministran potencia mecánica útil.

Si un motor síncrono tiene carga, no debe arrancarlo cuando existe excitación de corriente directa en su campo.

Reporte del equipo:

Incluya el **experimento inicial** en la sección discusión de resultados de la **práctica de laboratorio 2** (al iniciar la sección).

Ver la rúbrica para evaluar prácticas de laboratorio.

Referencias:

Diseño del complemento:

Práctica 1 y 2

“Tema 3” de la asignatura **“Máquinas Eléctricas”**

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del

Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Experimento de laboratorio No. 53 “El motor síncrono, parte I”,

54 “El motor síncrono, parte II”

y 55 “El motor síncrono, parte III”:

Experimento inicial de la práctica 2

EXPERIMENTOS CON EQUIPO ELÉCTRICO

Theodore Wildi, Michael J. De Vito

Editorial Limusa, México. 1975

Lab-Volt, Sistemas Educativos

Anexo

Solución de las prácticas de laboratorio

Práctica 1 *El generador síncrono*

Discusión de resultados:

Objetivo 1

c)

Si el motor a pasos gira hacia la derecha, **P1** ¿la secuencia de fases es positiva o negativa? **Positiva**
P2 ¿el defasamiento es 120°? **Si.**

Si el motor a pasos gira hacia la izquierda, **P3** ¿la secuencia de fases es positiva o negativa?
Negativa.

Conecte el galvanómetro 2 al tap 2, **P4** ¿la magnitud de esta tensión aumenta o disminuye?
Disminuye.

Gire el devanado 2 hacia el devanado 1 y coloquelo a 60°, **P5** ¿el defasamiento entre tensiones es 120°? **No.** **P6** ¿la posición de los devanados define el defasamiento de las tensiones inducidas? **Si.**

Objetivo 2

d)

Tabla a Valores medidos. Prueba de vacío. $n = 1800\text{rpm}$.

I_e A	$E_o = E_f$ V
0	0.65
0.1	32.96
0.2	59.52
0.3	83.77
0.4	101.09
0.5	113.79
0.6	122.57
0.7	128.86
0.8	134.00
0.9	138.56
1	142.31

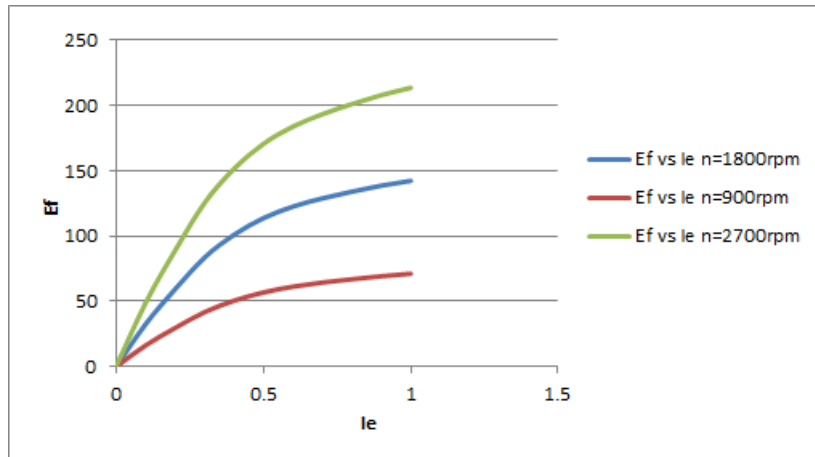


Figura d Curva de saturación del alternador.

P7 ¿Explique por qué el voltaje aumenta con menor rapidez cuando se incrementa la corriente de excitación? Para corrientes de excitación I_e del orden de 0.5A el circuito magnético del rotor inicia a saturarse. Por eso, cuando la corriente de excitación se incrementa sobre este valor, habrá un pequeño incremento de flujo magnético y por consecuencia un pequeño incremento de voltaje generado.

P8 ¿Cuáles serían algunas razones por las que no se debe operar un alternador cerca del codo de su curva de saturación? 1 Se requiere un aumento de corriente de excitación relativamente grande para sobreexcitar el alternador, 2 La eficiencia del alternador disminuye debido al aumento de potencia de cd en el rotor, 3 El rotor se sobrecalienta debido al incremento de la corriente de excitación, 4 Pérdidas de potencia en el hierro, 5 Un alternador sobreexcitado desarrolla más potencia mecánica lo que implica no solo corrientes I_e mas grandes por el rotor sino también corrientes I_L más grandes en el estator y 6 El ángulo de potencia crece y la máquina puede perder estabilidad.

d1)

$R_{RS} = 20\Omega$	$R_{RT} = 20.1\Omega$	$R_{ST} = 19.9\Omega$
---------------------	-----------------------	-----------------------

$$R_{s/faseT1} = 10\Omega$$

$$T_1 = 25^\circ\text{C}$$

e)

Tabla b Valores medidos. Preba de corto circuito. $n = 1800$ rpm.

I_e (A)	I_{Lcc} (A)
0.1	0.2
0.2	0.45
0.3	0.65
0.4	0.87
0.5	1.1

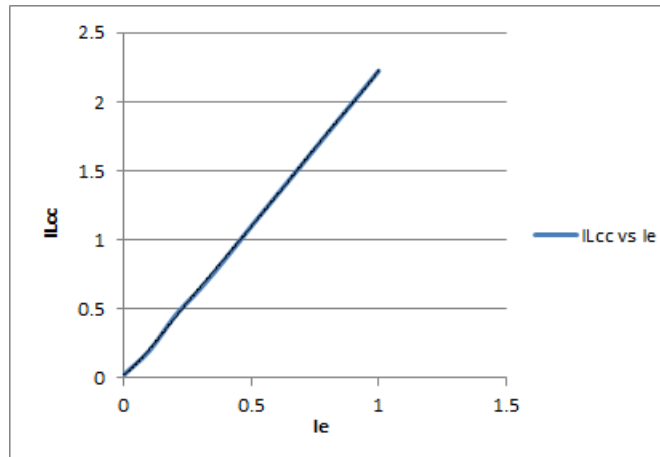


Figura f Caraterística del cortocircuito del alternador.

Tabla c Valores calculados de I_{Lcc} . $n = 1800\text{rpm}$.

I_e A	I_{Lcc} A
0	0.025
0.1	0.2
0.2	0.45
0.3	0.65
0.4	0.87
0.5	1.1
0.6	1.325
0.7	1.55
0.8	1.775
0.9	2
1	2.225

Tabla d Cálculo de la reactancia síncrona $X_{s/\text{fase}}$ del alternador trifásico.

I_e A	$X_{s/\text{fase}}$ Ω
0.1	156.23
0.2	138.65
0.3	126.38
0.4	115.41
0.5	104.08
0.6	92.85
0.7	82.96
0.8	75.23
0.9	69.46
1	63.90

Un alternador tiene menos probabilidades de quemarse cuando está en un corto circuito permanente, que un generador en derivación de corriente directa con excitación independiente. **P9**

¿Explique? La tabla d muestra que la impedancia $X_{s/fase}$ es alta, de modo que el corto circuito podría subsistir sin que la máquina se queme. En un generador de cd la resistencia de la armadura es pequeña, las corrientes de corto circuito son grandes lo que implica que la máquina presente más posibilidades de quemarse.

Objetivo 3

g)

Carga resistiva.

Tabla e Valores calculados (predicción de valores 1). Carga resistiva. No se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$. $T_1 = T_2 = 25^\circ C$.

R_f Ω	I_e A	I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	E_3 V	W_{21f} W	var_{21f} var	fp	δ_m $^\circ$
1200	0.6	0.1	12.1	0.92	9.33	12.00	0	1	2.19
600	0.63	0.2	24.4	3.58	18.05	24.00	0	1	4.18
400	0.65	0.3	36.9	7.89	26.47	36.00	0	1	6.03
300	0.68	0.4	49.6	13.56	34.14	48.00	0	1	7.64
240	0.72	0.5	62.5	20.30	40.92	60.00	0	1	9.00
200	0.75	0.6	75.6	28.37	47.66	72.00	0	1	10.28
171.4	0.79	0.7	88.91	37.20	53.60	84.01	0	1	11.35

Tabla f Valores medidos. Carga resistiva.
 $E_f = 120V$.

R_f Ω	I_e A	I_L A	W_{21f} W	var_{21f} var	δ_m $^\circ$
1200	0.6	0.1	12	0	2
600	0.66	0.2	23	0	5
400	0.68	0.3	37	0	7
300	0.73	0.4	47	0	10
240	0.78	0.5	59	0	15
200	0.82	0.6	71	0	20
171.4	0.89	0.7	83	0	23

Tabla g Valores calculados. Carga resistiva. Se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$.

R_f Ω	$R_{s/faseT2}$ Ω	$X_{s/fase}$ Ω
1200	10.00	92.85
600	10.18	86.68
400	10.37	84.78
300	10.56	80.40
240	10.75	76.60
200	10.93	73.95
171.4	11.12	69.99

Tabla h Valores calculados (predicción de valores 2). Carga resistiva. Se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$.

$R_{f/f}$ Ω	I_e A	I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	E_3 V	W_{21f} W	var_{21f} var	fp	δ_m °
1200	0.6	0.1	12.1	0.92	9.33	12.00	0	1	2.19
600	0.66	0.2	24.40	3.46	17.45	24.00	0	1	4.04
400	0.68	0.3	36.93	7.63	25.62	36.00	0	1	5.83
300	0.73	0.4	49.69	12.86	32.43	48.00	0	1	7.25
240	0.78	0.5	62.68	19.15	38.67	60.00	0	1	8.49
200	0.82	0.6	75.93	26.62	44.85	72.00	0	1	9.66
171.4	0.89	0.7	89.46	34.30	49.61	84.014	0	1	10.48

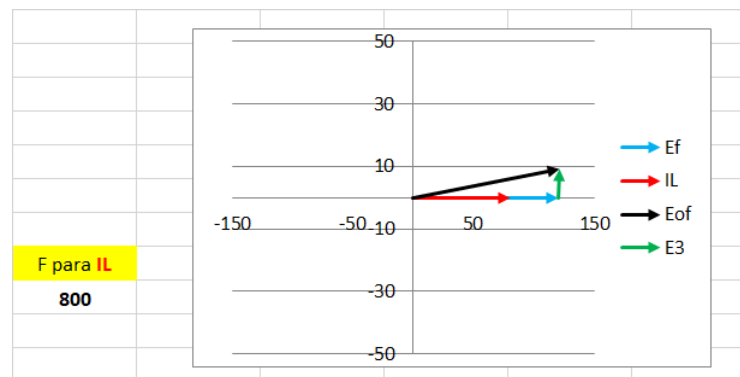
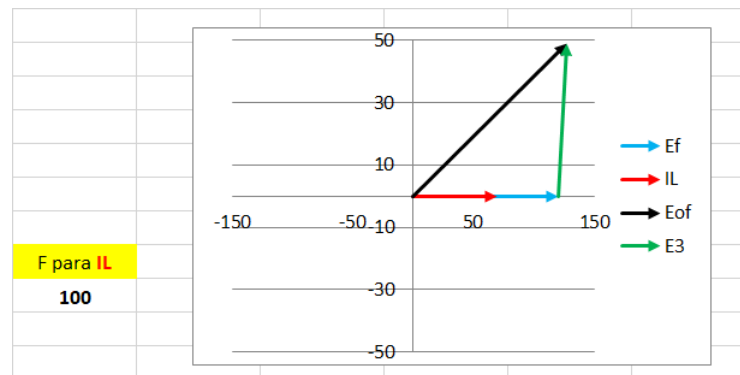


Figura h Diagrama fasorial para la carga $R_f = 1200\Omega$.



Caso 1

Conclusión:

- 1 La potencia reactiva fluye del lado de alto voltaje hacia el lado de bajo voltaje.
- 2 La resistencia de la línea de transmisión $R_{s/fase}$ es diferente de cero. La potencia activa fluye del lado de alto voltaje hacia el lado de bajo voltaje.

Figura i Diagrama fasorial para la carga $R_f = 171.4\Omega$.

Compare δ_m de las tablas f y h. **P10** ¿Explique porque la predicción no coincide con el valor real? De acuerdo con los valores de δ_m la máquina que impulsa al generador síncrono debe desarrollar 3 veces más potencia mecánica.

Carga inductiva.

Tabla **i** Valores calculados (predicción de valores 1). Carga inductiva. No se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$. $T_1 = T_2 = 25^\circ C$.

$X_{C/f}$ Ω	I_e A	I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	E_3 V	W_{21f} W	var_{21f} var	fp	δ_m °
1200	0.6	0.09	1.28	12.80	9.29	1.18	11.88	+0.09	-0.01
600	0.65	0.19	2.77	27.23	17.56	2.37	23.76	+0.09	-0.05
400	0.68	0.29	4.45	43.19	25.48	3.56	35.64	+0.09	-0.08
300	0.72	0.39	6.33	60.39	32.57	4.75	47.52	+0.09	-0.13
240	0.76	0.49	8.41	78.72	39.15	5.94	59.40	+0.09	-0.19
200	0.8	0.59	10.69	98.10	45.31	7.12	71.28	+0.09	-0.25
171.4	0.89	0.69	13.20	117.41	49.34	8.33	83.32	+0.09	-0.35

Tabla **j** Valores medidos. Carga inductiva.
 $E_f = 120V$.

$X_{C/f}$ Ω	I_e A	I_L A	W_{21f} W	var_{21f} var	δ_m °
1200	0.62	0.1	2	11	no se p m, es un valor -
600	0.69	0.2	3	25	no se p m, es un valor -
400	0.75	0.3	4	35	no se p m, es un valor -
300	0.79	0.4	6	47	no se p m, es un valor -
240	0.82	0.5	7	59	no se p m, es un valor -
200	0.89	0.6	8	70	no se p m, es un valor -
171.4	0.97	0.7	9	83	no se p m, es un valor -

No se puede medir (no se p m), es un valor negativo (-)

Tabla **k** Valores calculados. Carga inductiva. Se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$.

$X_{C/f}$ Ω	$R_{s/faseT2}$ Ω	$X_{s/fase}$ Ω
1200	10	90.73
600	10.18	83.86
400	10.37	78.81
300	10.56	75.91
240	10.75	73.95
200	10.93	69.99
171.4	11.12	65.72

Tabla 1 Valores calculados (predicción de valores 2). Carga inductiva. Se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$.

$X_{C/f}$ Ω	I_e A	I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	E_3 V	W_{21f} W	var_{21f} var	fp	δ_m °
1200	0.62	0.09	1.28	12.77	9.08	1.18	11.88	+0.09	-0.02
600	0.69	0.19	2.77	27.08	16.81	2.37	23.76	+0.09	-0.07
400	0.75	0.29	4.48	42.66	23.72	3.56	35.64	+0.09	-0.14
300	0.79	0.39	6.42	59.55	30.50	4.75	47.52	+0.09	-0.22
240	0.82	0.49	8.60	77.71	37.18	5.94	59.40	+0.09	-0.30
200	0.89	0.59	11.02	96.23	42.29	7.12	71.28	+0.09	-0.41
171.4	0.97	0.69	13.75	115.33	46.52	8.33	83.32	+0.09	-0.54

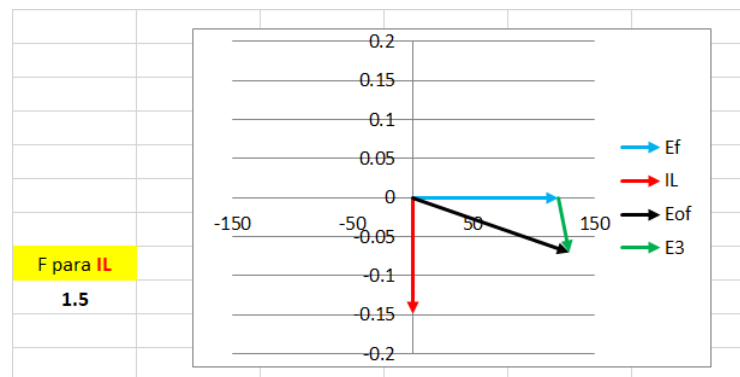
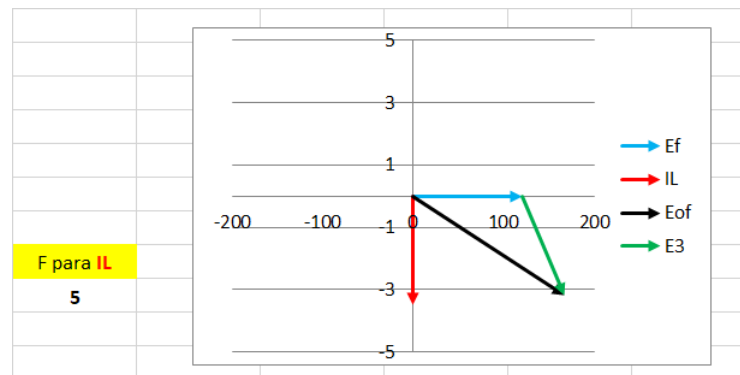


Figura j Diagrama fasorial para la carga $X_{L/f} = 1200\Omega$.



Caso 4

Conclusión:

- 1 La potencia reactiva fluye del lado de alto voltaje hacia el lado de bajo voltaje.
 - 2 La resistencia de la línea de transmisión $R_{s/fase}$ es diferente de cero. La dirección del flujo de potencia real es del extremo con el voltaje atrasado hacia el adelantado.
- El caso puede validarse utilizando el **complemento: Reto 1**. El caso 4 solo se presenta cuando la carga conectada al generador es inductiva.

Figura k Diagrama fasorial para la carga $X_{L/f} = 171.4\Omega$.

Carga capacitiva.

Tabla **m** Valores calculados (predicción de valores 1). Carga capacitiva. No se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$. $T_1 = T_2 = 25^\circ C$.

$X_{L/f}$ Ω	I_e A	I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	E_3 V	W_{21f} W	var_{21f} var	fp	δ_m °
1200	0.55	0.09	0.21	-11.01	9.88	0.11	-11.99	-0.009	0.28
600	0.5	0.19	0.63	-19.83	20.91	0.23	-23.99	-0.009	0.63
400	0.45	0.29	1.25	-26.11	33.07	0.35	-35.99	-0.009	1.09
300	0.41	0.39	2.07	-29.70	45.89	0.47	-47.99	-0.009	1.71
240	0.36	0.49	3.09	-30.04	60.11	0.59	-59.99	-0.009	2.65
200	0.3	0.59	4.31	-26.49	76.06	0.71	-71.99	-0.009	4.34
171.4	0.25	0.70	5.74	-19.24	92.77	0.84	-84.00	-0.009	8.01

Tabla **n** Valores medidos. Carga capacitiva.

$E_f = 120V$.

$X_{L/f}$ Ω	I_e A	I_L A	W_{21f} W	var_{21f} var	δ_m °
1200	0.55	0.10	no se p m, es un valor +	-11.99	no se p m, es un valor +
600	0.51	0.19	no se p m, es un valor +	-23.99	1
400	0.46	0.29	no se p m, es un valor +	-35.99	2
300	0.40	0.38	no se p m, es un valor +	-47.99	3
240	0.33	0.49	no se p m, es un valor +	-59.99	4
200	0.29	0.58	no se p m, es un valor +	-71.99	5
171.4	0.24	0.69	no se p m, es un valor +	-84.00	6

No se puede medir (no se p m), es un valor positivo (+)

Tabla **o** Valores calculados. Carga capacitiva. Se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$.

$X_{L/f}$ Ω	$R_{s/faseT2}$ Ω	$X_{s/fase}$ Ω
1200	10	98.38
600	10.18	102.93
400	10.37	108.66
300	10.56	115.41
240	10.75	123.08
200	10.93	127.49
171.4	11.12	133.36

Tabla p Valores calculados (predicción de valores 2). Carga capacitiva. Se corrige la resistencia síncrona $R_{s/fase}$ por efecto de temperatura. $E_f = 120V$.

$X_{L/f}$ Ω	I_e A	I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	E_3 V	W_{21f} W	var_{21f} var	fp	δ_m °
1200	0.55	0.09	0.21	-11.01	9.88	0.11	-11.99	-0.009	0.28
600	0.51	0.19	0.64	-19.88	20.68	0.23	-23.99	-0.009	0.64
400	0.46	0.29	1.29	-26.21	32.74	0.35	-35.99	-0.009	1.12
300	0.40	0.39	2.16	-29.53	46.35	0.47	-47.99	-0.009	1.81
240	0.33	0.49	3.28	-29.22	61.77	0.59	-59.99	-0.009	2.92
200	0.29	0.59	4.65	-26.09	76.77	0.71	-71.99	-0.009	4.77
171.4	0.24	0.70	6.29	-18.64	93.68	0.84	-84.00	-0.009	9.03

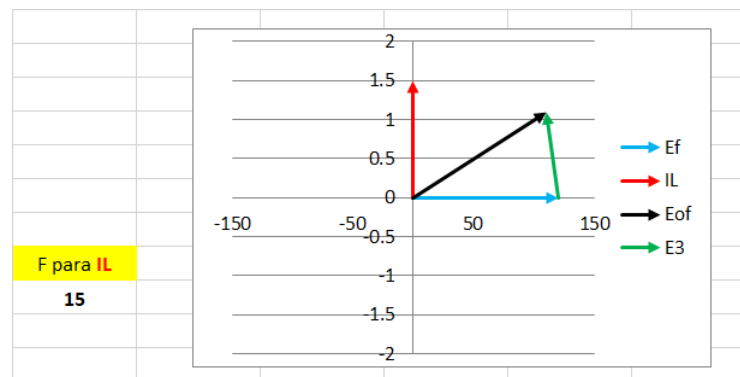
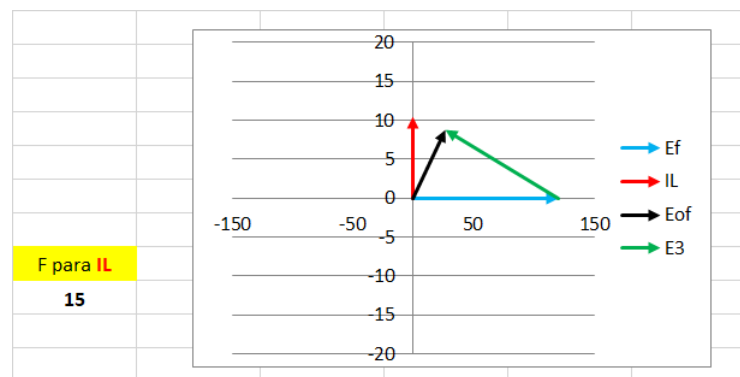


Figura l Diagrama fasorial para la carga $X_{C/f} = 1200\Omega$.



Caso 5

Conclusión:

- 1 La potencia reactiva fluye del lado de alto voltaje hacia el lado de bajo voltaje.
 - 2 La resistencia de la línea de transmisión $R_{s/fase}$ es diferente de cero. La potencia activa fluye del lado de bajo voltaje hacia el lado de alto voltaje.
- El caso puede validarse utilizando el **complemento: Reto 1**. El caso 5 solo se presenta cuando la carga conectada al generador es capacitiva.

Figura m Diagrama fasorial para la carga $X_{C/f} = 171.4\Omega$.

h)

Tabla q % de regulación de voltaje.

R_{f} Ω	Carga resistiva		
	E_{of} V	E_f V	% reg vol
1200	121.35	120	1.11
171.4	136.86	120	12.32
$X_{L/f}$ Ω	Carga inductiva		
	E_f (V)	E_{of}	% reg vol
1200	129.08	120	7.03
171.4	166.44	120	27.90
$X_{C/f}$ Ω	Carga capacitiva		
	E_f (V)	E_{of}	% reg vol
1200	110.17	120	-8.91
171.4	28.10	120	-326.94

Práctica 2 El motor síncrono

Discusión de resultados:

Experimento inicial:

El motor síncrono y el electrodinamómetro Equipo a utilizar: Lab-Volt

Objetivo 1

a)

P1 ¿Porqué el devanado de campo de la máquina síncrona debe operar con corriente directa? En el complemento: Práctica 1 Tema 4 se analiza y concluye que el campo magnético giratorio trifásico es un campo magnético bipolar que gira 120° cada tercio de periodo, con una velocidad que depende de la frecuencia de alimentación y del número de polos. El devanado de campo del motor síncrono porta corriente directa y crea otro campo magnético bipolar que reacciona con el campo magnético giratorio trifásico, lo que hace posible que la máquina entre en sincronismo.

Tabla p Valores medidos. Inductancia síncrona.
Mínima corriente de excitación $I_e = 0.1A$.

I_{L1} (A)	I_{L2} (A)	I_{L3} (A)
0.73	0.73	0.73

$$n_{\text{bajoexcitada}} = 1800\text{rpm}$$

P2 ¿Cuál es su predicción si el arranque se efectúa con el interruptor s cerrado? El campo magnético creado por la corriente de excitación I_e frena al campo magnético giratorio trifásico y el rotor del motor síncrono por consecuencia frena, el motor síncrono experimenta esfuerzos mecánicos y transitorios electromagnéticos en las corrientes por el estator I_L . Si la corriente de excitación I_e es pequeña y considerando que la máquina síncrona opera en vacío es posible que arranque.

Tabla q Valores medidos. Resistencia síncrona.
Corriente de excitación normal, $I_e = 0.52A$.

I_{L1} (A)	I_{L2} (A)	I_{L3} (A)
0.09	0.09	0.09

$$n_{\text{excitación normal}} = 1800\text{rpm}$$

Tabla r Valores medidos. Capacitancia síncrona.
Máxima corriente de excitación $I_e = 0.82A$.

I_{L1} (A)	I_{L2} (A)	I_{L3} (A)
0.37	0.37	0.37

$$n_{\text{sobreexcitada}} = 1800\text{rpm}$$

P3 ¿Se mantiene constante la velocidad para cualquier valor de corriente de excitación? **Si.**

Rotación = **Horario**

Rotación = **Antihorario**

Objetivo 2

b)

Tabla s Valores medidos. $\tau = 9\text{lb}_f\text{-plg}$.

I_{L1} (A)	I_{L2} (A)	I_{L3} (A)
0.8	0.8	0.8

$n_{\text{excitación normal}} = 1800\text{rpm}$

Haga variar la corriente de excitación I_e , haciendo girar la perilla de control del reóstato en tanto que se conserva la carga de $9\text{lb}_f\text{-plg}$ **P4** ¿Qué efecto se produce en las tres corrientes del estator cuando varía la excitación de cd? **La excitación máxima-mínima o la regulación del factor de potencia produce un aumento de la corriente por los devanados del estator.** **P5** ¿El ángulo de potencia cambia? **Si.**

$n_{\text{excitación mínima}} = 1800\text{rpm}$

$n_{\text{excitación máxima}} = 1800\text{rpm}$

P6 ¿Pierde sincronismo el motor cuando la excitación de cd es demasiado baja? **Para la potencia desarrollada no.**

P7 ¿Cuál sería su predicción si $I_e = 0$? **La máquina pierde sincronismo, oscila, su comportamiento es marginalmente estable.**

$hp_{\tau = 9\text{ lb}_f\text{-plg}} = 0.2575$ caballos de potencia

$\tau_{\text{de ruptura}} = \tau_{\text{ruptura}} = 21\text{lb}_f\text{-plg}$

$hp_{\tau_{\text{de ruptura}}} = 0.6010$ caballos de potencia

P8 ¿Es posible modificar la potencia de salida P_m de un motor síncrono? **Si.** **P9** ¿Explique? **La potencia de salida de un motor síncrono se puede aumentar, aumentando la excitación de cd del rotor, que a su vez, aumenta la fuerza del campo magnético producido por el rotor, causando una atracción más intensa entre los polos del rotor y el campo magnético giratorio trifásico creado en el estator.**

Práctica de laboratorio 2:

Objetivo 1

a)

Tabla a Valores medidos. Motor síncrono bajo carga (1/3 de Pm).

$$I_e = 0.6 \text{ A}, E_L = 208 \text{ V}$$

I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	δ_m °	Condición de operación
0.5	58	0	-9	R

b)

b1)

Tabla b Valores calculados. Motor síncrono bajo carga (1/3 de Pm).

$R_{s35^\circ C}$ Ω	X_s Ω
10.37	92.85

b3)

Tabla c Valor calculado (predicción). Motor síncrono bajo carga (1/3 de Pm).

$$E_{oL} = E_L = 208 \text{ V}$$

δ_e °
21.92

b4)

Tabla d Valores calculados (predicción). Motor síncrono bajo carga (1/3 de Pm).

$$E_{oL} = E_L = 208 \text{ V}$$

δ_e °	W_{11f} W	var_{11f} var
-21.92	58.52	4.69

b5)

Tabla e Valores calculados (valores exactos). Motor síncrono bajo carga (1/3 de Pm).

$$I_e = 0.6 \text{ A}, E_L = 208 \text{ V}$$

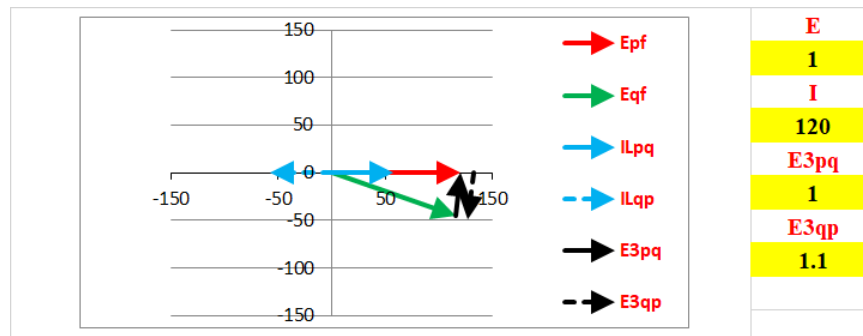
$E_{of} \text{ (V)}$	
E_{of}	$\angle \delta_e$
123.50	-21.29

$I_L \text{ (A)}$		$E_3 \text{ (V)}$	
I_L	$^\circ$	E_3	$^\circ$
0.48	0	45.12	83.62

$W_{11f} \text{ (W)}$	$\text{var}_{11f} \text{ (var)}$	$W_{21f} \text{ (W)}$	$\text{var}_{21f} \text{ (var)}$
58	0	55.57	-21.66

δ_m $^\circ$
-10.64

b6)



Caso 5

Conclusión:

- 1 La potencia reactiva fluye del lado de alto voltaje hacia el lado de bajo voltaje.
- 2 La resistencia de la línea de transmisión R_s es diferente de cero. La potencia activa fluye del lado de bajo voltaje hacia el lado de alto voltaje.

El caso puede validarse utilizando el **complemento: Reto 1**.

Figura b Diagrama fasorial del motor síncrono (1/3 de Pm).

c)

Tabla f Valores medidos. Motor síncrono bajo carga (2/3 de Pm).

$$I_e = 0.45 \text{ A}, E_L = 208 \text{ V}$$

I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	δ_m $^\circ$	Condición de operación
1	116	24	-25	L

Tabla g Valores calculados. Motor síncrono bajo carga (2/3 de Pm).

$R_{s35^{\circ}\text{C}}$	X_s
Ω	Ω
10.37	109.79

Tabla h Valor calculado (predicción). Motor síncrono bajo carga (2/3 de Pm).

$$E_{oL} = E_L = 208\text{V}$$

δ_e °
62.02

Tabla i Valores calculados (predicción). Motor síncrono bajo carga (2/3 de Pm).

$$E_{oL} = E_L = 208\text{V}$$

δ_e °	W_{11f} W	var_{11f} var
-62.02	121.50	58.25

Tabla j Valores calculados (valores exactos). Motor síncrono bajo carga (2/3 de Pm).

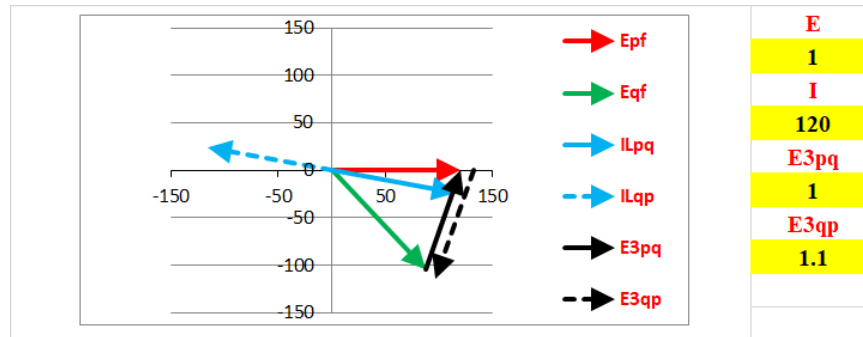
$$I_e = 0.45\text{ A}, E_L = 208\text{ V}$$

$\mathbf{E_{of}}$ $\mathbf{V}$	
E_{of}	$\angle\delta_e$
136.30	-49.72

I_L A		E_3 V	
I_L	°	E_3	°
0.98	-11.68	108.78	72.91

W_{11f} W	var_{11f} var	W_{21f} W	var_{21f} var
116	24	105.90	-82.83

δ_m °
-24.86



Caso 3

Conclusión:

La resistencia de la línea de transmisión R_s es diferente de cero. El transmisor entrega tanto potencia activa como reactiva a la línea, y el receptor absorbe potencia activa de ella. Sin embargo, el receptor entrega potencia reactiva a la línea, de modo que la potencia reactiva total recibida por la línea sea 106.83var. El receptor entrega más potencia reactiva con respecto al transmisor.

Figura c Diagrama fasorial del motor síncrono (2/3 de P_m).

d)

Tabla k Valores medidos. Motor síncrono bajo carga (3/3 de P_m).

$$I_e = 0.9A, E_L = 208V$$

I_L A	W_{11f} W	Var_{11f} var	δ_m °	Condición de operación
1.3	175	-20	-21	C

Tabla l Valores calculados. Motor síncrono bajo carga (3/3 de P_m).

$R_{s35^\circ C}$ Ω	X_s Ω
10.37	69.46

Tabla m Valor calculado (predicción). Motor síncrono bajo carga (3/3 de P_m).

$$E_{oL} = E_L = 208V$$

δ_e °
57.45

Tabla n Valores calculados (predicción). Motor síncrono bajo carga (3/3 de P_m).

$$E_{oL} = E_L = 208V$$

δ_e °	W_{11f} W	var_{11f} var
-57.25	185.19	68.25

Tabla o Valores calculados (valores exactos). Motor síncrono bajo carga (3/3 de Pm).

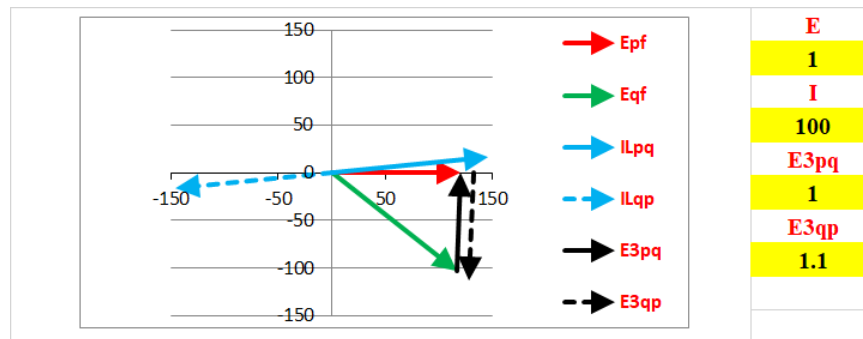
$$I_e = 0.9A, E_L = 208V$$

E_{of} V	
E_{of}	$\angle \delta_e$
155.50	-41.45

I_L A		E_3 V	
I_L	°	E_3	°
1.46	6.51	103.01	88.02

W_{11f} W	var_{11f} var	W_{21f} W	var_{21f} var
175	-20	152.67	-169.44

δ_m °
-20.72



Caso 1

Conclusión:

- 1 La potencia reactiva fluye del lado de alto voltaje hacia el lado de bajo voltaje.
- 2 La resistencia de la línea de transmisión $R_{s/fase}$ es diferente de cero. La potencia activa fluye del lado de alto voltaje hacia el lado de bajo voltaje.

Figura d Diagrama fasorial del motor síncrono (3/3 de Pm).

Tema 4

“Motores de inducción”



4.1 Principio y análisis del motor jaula de ardilla

El rotor más común y ampliamente utilizado en los motores de inducción se conoce como jaula de ardilla, que da nombre al "motor de inducción jaula de ardilla". Este tipo de rotor está formado por un núcleo de hierro laminado que presenta ranuras longitudinales en su borde. En estas ranuras se insertan barras sólidas hechas de cobre o aluminio. En los extremos del rotor, se localizan los anillos de cortocircuito, que están soldados o fijados a las barras, creando una estructura muy resistente. Dado que la resistencia de las barras de cortocircuito es mucho más baja que la del núcleo, no es necesario aislarlas de manera especial del núcleo. En algunos diseños de rotores, las barras junto con los anillos en los extremos se funden en una sola pieza que se coloca en el núcleo, y esta estructura en cortocircuito permite que las corrientes sean inducidas en ellas por el flujo del campo del estator.

Al compararlo con el complejo bobinado del rotor devanado o la armadura de un motor de corriente directa, el rotor tipo jaula de ardilla resulta ser bastante sencillo. Su fabricación es simple y normalmente funciona sin causar inconvenientes.

En un motor de inducción tipo jaula de ardilla ensamblado, el rotor tiene un pequeño espacio que lo separa del estator en su periferia. Este espacio, llamado entrehierro, es realmente tan pequeño como lo permiten las normas mecánicas. Esto garantiza que la inducción electromagnética que se produce sea lo más intensa posible.

Al suministrar energía al estator de un motor de inducción, se genera un campo magnético en rotación. Cuando este campo empieza a moverse, las líneas de flujo atraviesan las barras de cortocircuito que rodean el rotor de jaula de ardilla, lo que lleva a la inducción de voltaje a través de inducción electromagnética. Dado que estas barras están conectadas en cortocircuito con poca resistencia, los voltajes inducidos causan corrientes elevadas que fluyen a través de las barras del rotor. Estas corrientes en el rotor crean campos magnéticos potentes. A su vez, estos campos producen polos magnéticos que son atraídos por el campo en rotación. Así, el rotor se mueve junto con el campo principal.

El par de arranque del motor de inducción de jaula de ardilla es bajo, ya que el rotor detenido posee una reactancia inductiva X_L que es bastante alta en comparación con su resistencia R . En esta situación, la corriente del rotor se retrasa 90° respecto al voltaje del rotor, resultando en un bajo factor de potencia en el circuito. Esto implica que el motor no es efectivo como carga y que no puede extraer energía útil de la fuente de alimentación para su funcionamiento.

A pesar de que no es muy eficiente, se genera un par y el motor empieza a girar. A medida que comienza a moverse, la diferencia de velocidad entre el rotor y el campo magnético que gira, conocido como deslizamiento, cambia de un máximo del 100% a un valor intermedio, como por ejemplo el 50%. Al disminuir el deslizamiento de esta manera, la frecuencia de los voltajes que se inducen en el rotor se reduce, ya que el campo giratorio corta los conductores a una velocidad más baja. Esto a su vez provoca que la reactancia inductiva del rotor disminuya. Cuando la reactancia inductiva baja, el factor de potencia comienza a mejorar; esta mejora se manifiesta como un aumento en el par y, posteriormente, un incremento en la velocidad.

Cuando el deslizamiento se sitúa entre el 2% y el 10%, se observa una estabilización en la velocidad del motor. Esto se debe a que el par del motor se reduce como resultado de la caída en

los voltajes y las corrientes inducidas en el rotor. El ligero deslizamiento permite que las barras del rotor interactúen mínimamente con el flujo del campo giratorio del estator. Como resultado, el motor logra un control de velocidad automático que se asemeja a la función de la CFEM en un motor de corriente continua.

El funcionamiento de este sistema se basa en el fenómeno de inducción. Este proceso implica que la energía eléctrica llega al devanado del estator, lo que provoca que se transfiera magnéticamente al rotor mediante un campo magnético que gira en el estator.

Si sustituyéramos el estator por un anillo de polos magnéticos ideales que giran a una velocidad síncrona n_s , en el devanado del rotor se generaría un sistema de fuerza contra electromotriz trifásica. Por lo tanto, al conectar el circuito eléctrico del rotor, un flujo de corrientes trifásicas circularía a través de él. Esto, al interactuar con los polos inductores, produciría un par que intentaría detener el inductor si el rotor estuviera bloqueado. Dado que el motor puede girar libremente, el campo inductivo lo guiará y aumentará su velocidad de rotación. Sin embargo, nunca alcanzará la velocidad síncrona n_s , ya que si se llegara a este punto, el movimiento relativo entre los campos inductivos y los inducidos cesaría y el par se anularía.

Conocida como n , la velocidad del rotor, el deslizamiento relativo s , que también se llama simplemente deslizamiento, se calcula de la siguiente manera:

$$s = (n_s - n) / n_s \quad 1$$

donde:

n_s velocidad del campo magnético giratorio (rpm o min^{-1})

Los motores asíncronos, también conocidos como motores de inducción, pueden contar con dos tipos de rotores: uno es el rotor de jaula de ardilla (motor de inducción con jaula de ardilla) y el otro es el rotor a anillos (motor de inducción con rotor bobinado).

Las máquinas de corriente alterna se clasifican en dos tipos: máquinas síncronas, que incluyen generadores y motores, y máquinas asíncronas.

Los motores de inducción se encuentran entre las máquinas más comunes debido a su diseño sencillo, su seguridad en el uso y su costo realmente bajo.

Análisis del campo magnético giratorio. Bajo ciertas circunstancias, las corrientes trifásicas son capaces de generar campos magnéticos en rotación, tal como lo mostró Galileo Ferraris.

Un campo magnético giratorio se refiere a un campo magnético que tiene un vector $\mathbf{H}$ con intensidad constante, el cual rota de manera uniforme en el espacio alrededor de un punto específico.

a) Campo magnético pulsante

Un circuito de corriente alterna de fase única (ver figura 1) que suministra energía al devanado de una bobina genera en un punto P a lo largo de su eje un campo magnético $\mathbf{H}$. Este campo tiene una dirección constante, pero su amplitud y sentido cambian dependiendo del momento de la corriente (campo magnético pulsante).

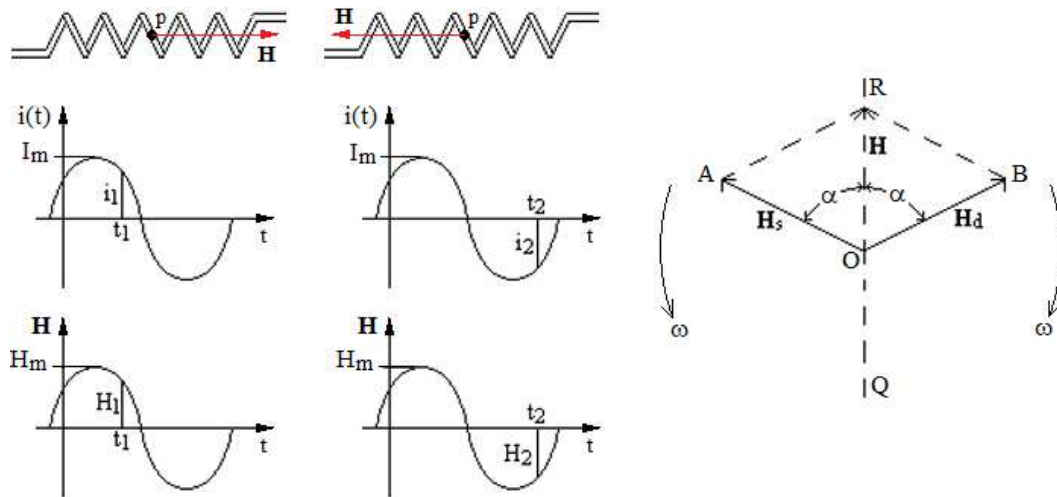


Figura 1 Campo magnético producido por la corriente alterna alimentando al devanado de una bobina.

El campo magnético pulsante puede ser visto como formado en cada momento por dos campos magnéticos que tienen una intensidad fija, cada uno de ellos equivale a la mitad del valor máximo de H_M . Estos campos giran en direcciones opuestas a la misma velocidad, completando una vuelta en el tiempo que corresponde a un ciclo de corriente alterna. Los dos campos en rotación se representan mediante los vectores $OA=H_s$ (izquierdo) y $OB=H_d$ (derecho), y juntos generan un campo resultante H en una dirección constante QR . Este campo varía entre un valor máximo positivo de $H_s+H_d=H_M$ (cuando $\alpha=0^\circ$) y un valor negativo de $-(H_s+H_d)=-H_M$ (cuando $\alpha=180^\circ$), nulificándose para $\alpha=90^\circ$.

b) Campo magnético giratorio trifásico

Para generar un campo magnético rotativo trifásico H , es esencial contar con tres bobinas idénticas. Los ejes de estas bobinas se sitúan en un plano, separados por 120° en oposición entre sí, y sus devanados están conectados a un sistema simétrico de corriente trifásica (ver figura 2).

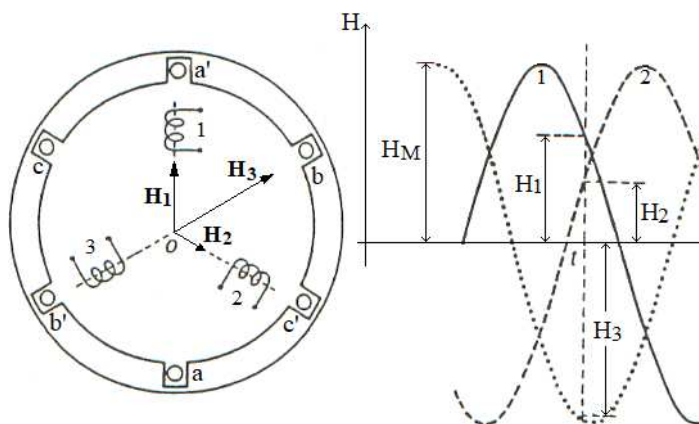


Figura 2 Campo magnético giratorio trifásico.

Las tres bobinas producen en la región central tres campos magnéticos, H_1 , H_2 y H_3 que logran la misma intensidad H_M de manera cíclica en un tiempo equivalente a un tercio de periodo.

Si ahora cada uno de estos tres vectores $\mathbf{H}_1$, $\mathbf{H}_2$ y $\mathbf{H}_3$ son separados en sus componentes (componentes vectoriales de rotación hacia la izquierda y componentes vectoriales de rotación hacia la derecha) tal como se ilustra en la figura 3a, se puede identificar la acción combinada de las tres bobinas en la zona central 0 como una suma vectorial de todas las componentes de rotación a la izquierda y a la derecha, como se observa en la figura 3b.

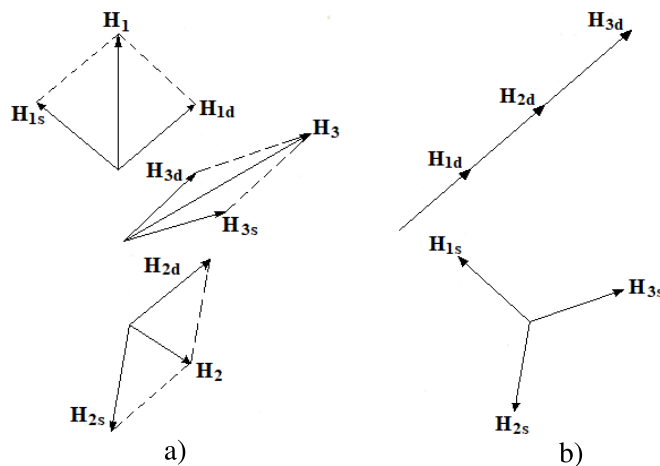


Figura 3 Componentes vectoriales de los vectores $\mathbf{H}_1$, $\mathbf{H}_2$ y $\mathbf{H}_3$.

Los componentes giratorios $\mathbf{H}_{1s}$, $\mathbf{H}_{2s}$ y $\mathbf{H}_{3s}$ producen una suma nula porque tienen la misma intensidad, aunque están desfasados 120 grados.

Las componentes rotatorias a la derecha, $\mathbf{H}_{1d}$, $\mathbf{H}_{2d}$ y $\mathbf{H}_{3d}$, son, a diferencia de lo que se podría pensar, paralelas entre sí. Esto produce un vector $\mathbf{H}$ que tiene una magnitud que es la suma de $\mathbf{H}_{1d}$, $\mathbf{H}_{2d}$ y $\mathbf{H}_{3d}$, es decir, $H = H_{1d} + H_{2d} + H_{3d}$.

Al aplicar el razonamiento previamente mencionado para cualquier otro momento, las componentes que giran a la izquierda producirán siempre un resultado nulo, de modo que el vector resultante $\mathbf{H}$ se formará únicamente a partir de la suma vectorial de las componentes que giran a la derecha, las cuales siempre son paralelas entre sí. De hecho, dado que $H_s = H_d = (1/2)H_M$, la intensidad del vector resultante del campo magnético será $H = 3H_d = (3/2)H_M$, y este rotará en el plano en una dirección de rotación a la derecha (similar al movimiento de las agujas de un reloj) con una velocidad angular constante.

La velocidad de rotación n_s de un campo magnético en movimiento está relacionada con la frecuencia f (Hz o cps) de las corrientes que lo alimentan y el número de polos p , según la siguiente fórmula:

$$n_s = (f/p) 120 \quad 2$$

La velocidad síncrona (velocidad del campo magnético giratorio) en rad/s es:

$$[(f/p) 120 \text{ rev/min}] [2\pi \text{ rad/ 1rev}] [1 \text{ min} / 60 \text{ s}] = \omega_s = (2\pi N_s) / 60, \text{ rad/s} \quad 3$$

La dirección en la que gira el campo magnético se alinea con el ciclo de la fase. Por lo tanto, para cambiar la dirección de la rotación, solo es necesario invertir el ciclo de la fase.

Otra forma de analizar el campo magnético giratorio es mediante la figura 4. La figura 4 utiliza la **conexión 4** de la figura o del **complemento educativo: Práctica 1 Objetivo 2**. Para analizar la figura 4 considere la figura 5, la figura 5 muestra el devanado del estator de un motor de inducción con 6 grupos de bobinas (estator del motor de inducción del sistema electromecánico Microlab De Lorenzo).

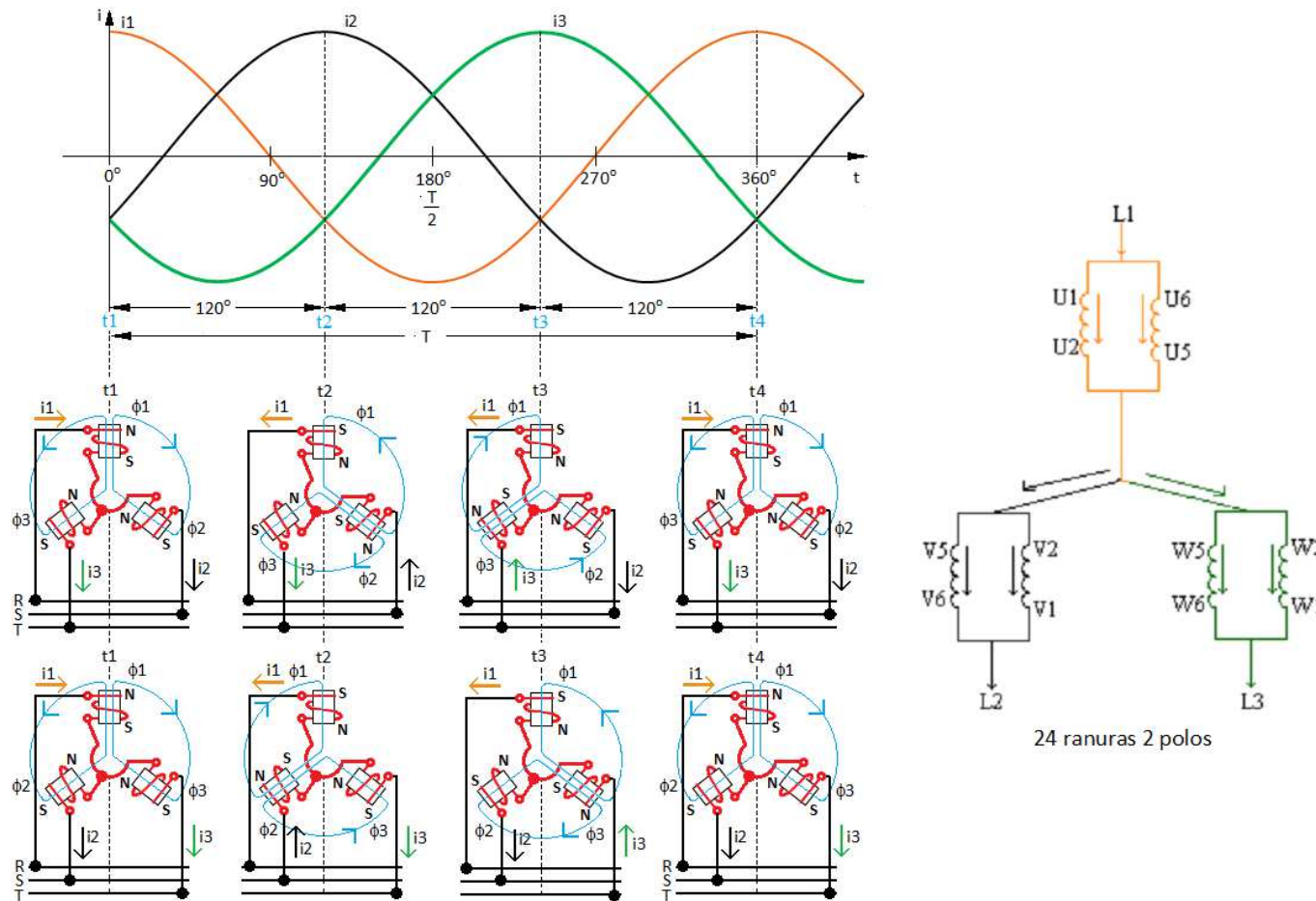


Figura 4 Campo magnético giratorio trifásico e inversión del sentido de rotación.

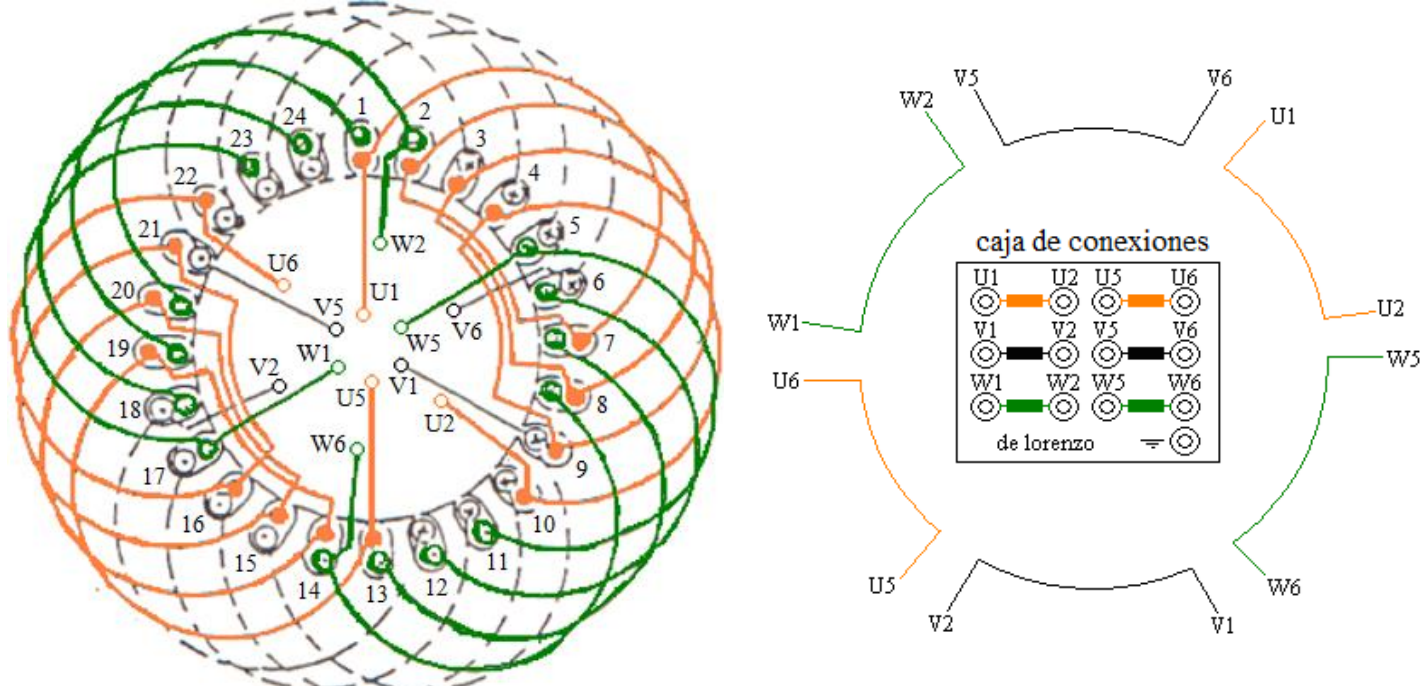


Figura 5 Estator del motor de inducción con 6 grupos de bobinas (estator del motor de inducción del sistema electromecánico Microlab De Lorenzo).

Los datos del devanado son:

Paso del devanado: 1 a 7, doble nivel
Vueltas: 19, dos conductores en paralelo
Diámetro del conductor: 0.724 mm, cal 21
Conductores por ranura: 76

4.2 Principio y análisis del motor con rotor devanado

Al conectar el estator de un motor trifásico a una fuente de energía de tres fases, la corriente fluye a través de los tres devanados y genera un campo magnético en movimiento. Las tres corrientes de excitación ofrecen la energía reactiva necesaria para crear este campo magnético giratorio. Además, suministran la energía que el motor utiliza debido a las pérdidas en los materiales de cobre y hierro.

La frecuencia de la fuente de alimentación trifásica establece la velocidad del campo magnético rotativo, un término que se conoce como velocidad síncrona. CFE controla cuidadosamente la frecuencia de los sistemas eléctricos, asegurando que se mantenga constante. Como resultado, la velocidad síncrona del campo asociado al estator no cambia.

El rotor con devanados consta de un núcleo que tiene tres devanados en lugar de las barras conductoras que se encuentran en un rotor de tipo jaula de ardilla. En esta configuración, las corrientes se generan en los devanados de manera similar a como lo harían en las barras en cortocircuito. No obstante, la principal ventaja de utilizar devanados radica en que se pueden conectar terminales mediante anillos colectores, lo que permite controlar de manera efectiva la impedancia y, en consecuencia, la corriente que circula por los devanados.

El campo magnético en movimiento genera un voltaje alterno en cada bobina del rotor. Cuando el rotor no está en movimiento, la frecuencia del voltaje que se induce en él coincide con la de la fuente de alimentación. Si el rotor rota en la misma dirección que el campo en movimiento del estator, la velocidad con la que el flujo magnético atraviesa las bobinas del rotor se reduce. A su vez, el voltaje inducido y su frecuencia también disminuirán. En el caso de que el rotor gire a la misma velocidad y en la misma dirección que el campo del estator, el voltaje inducido y su frecuencia se reducen a cero (el rotor ahora está funcionando a la velocidad síncrona). Por otro lado, si el rotor alcanza la velocidad síncrona pero en dirección opuesta a la del campo giratorio del estator, el voltaje inducido y su frecuencia resultan ser el doble de los valores observados cuando el rotor está inmóvil.

De lo mencionado, un voltaje se genera en los devanados del rotor cuando el circuito del rotor se encuentra abierto, y este voltaje cambia de forma lineal con el deslizamiento del rotor, volviéndose nulo al alcanzar la velocidad síncrona. Si se produce un cortocircuito en los devanados del rotor, el voltaje inducido causará corrientes elevadas en dichos devanados. Para proporcionar esta corriente en el rotor, la corriente del estator necesita aumentar más allá del nivel normal de corriente de excitación. La energía (VA) utilizada en los devanados del rotor debe ser entregada por los devanados del estator. Por ello, es necesario que ocurra lo siguiente:

- 1 Cuando el motor no está en movimiento o funciona a pocas revoluciones, las corrientes del rotor y del estator, así como el par, serán altos.
- 2 A la velocidad síncrona, la corriente en el rotor y el par serán nulos, y el estator únicamente conducirá la corriente de excitación.
- 3 A cualquier velocidad del motor, las corrientes y el par que se generan tendrán valores que estarán entre esos dos límites.

Las tres terminales de los devanados del rotor trifásico se dirigen hacia tres anillos colectores que están fijados al eje del rotor. Las escobillas que hacen contacto con estos anillos son esenciales para asegurar el mejor rendimiento del motor de rotor devanado. Si estas escobillas se conectan con reóstatos, se puede generar un par de arranque más alto que el que produce un motor de jaula de ardilla. Al momento de iniciar el motor, la resistencia total de los reóstatos se integra en los circuitos del rotor, lo que brinda así el par de arranque máximo.

A medida que el motor se aproxima a su velocidad de funcionamiento normal, la resistencia del reóstato disminuye poco a poco y se desconecta del rotor al alcanzar la velocidad máxima. Aunque el par de arranque del motor con rotor devanado es mayor, su eficiencia a plena velocidad no se compara con la del motor de jaula de ardilla, ya que la resistencia de los devanados del rotor siempre es superior a la del motor de jaula de ardilla.

Una particularidad del motor de rotor devanado es que puede funcionar a diferentes velocidades. Al modificar la resistencia del reóstato, se puede cambiar el deslizamiento y, por ende, la velocidad del motor. En estas situaciones, operar el motor a una velocidad inferior a la máxima implica que trabaja con menor eficiencia y potencia. Asimismo, este motor se vuelve más sensible a cambios en la velocidad cuando la carga cambia, debido a la alta resistencia del rotor.

Un motor de inducción con rotor devanado puede transformarse en un motor síncrono de inducción de rotor devanado. En un motor asíncrono trifásico, las corrientes trifásicas de baja frecuencia que fluyen en el rotor, que están conectadas en estrella, generan polos que giran a una velocidad ($n_s - n$) alrededor del propio rotor (figura 6).

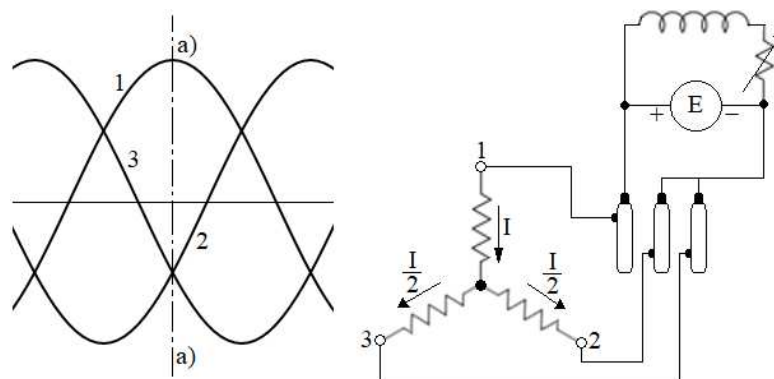


Figura 6 Conexión del rotor del motor de inducción de rotor devanado para obtener una máquina síncrona (motor de inducción de rotor devanado sincronizado).

Si analizamos el momento a)-a) de la figura 6, observamos que la corriente en la fase 1 alcanza su punto máximo, mientras que en las otras dos fases está a la mitad pero en negativo. Conectar los anillos del rotor a una fuente E de corriente directa puede ayudar a estabilizar, "por decirlo de alguna manera", este momento. Al hacerlo, los polos inducidos en el rotor se mantendrán en la posición que ocupaban en el instante a)-a), convirtiendo al rotor en un inductor de valor constante que seguirá girando a la velocidad de sincronismo n_s .

Los motores síncronos que están sincronizados se basan en la estructura básica de un motor asíncrono que tiene un rotor de anillo, y generalmente se inician utilizando el reóstato del rotor R (ver figura 7).

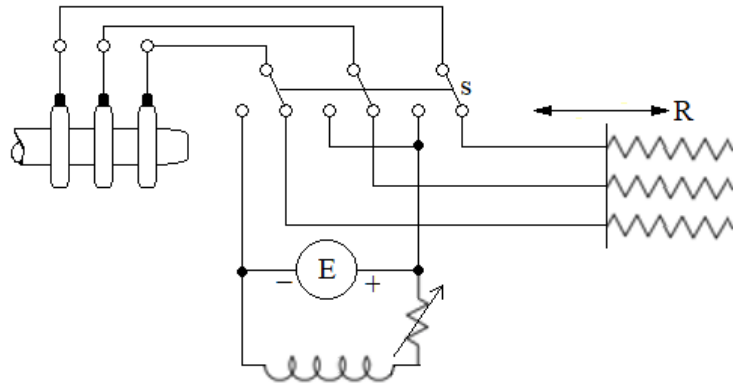


Figura 7 Motor síncrono sincronizado.

Una vez que se ha encendido el motor, el reóstato R se desactiva mediante el interruptor s. De esta forma, los anillos del rotor reciben energía de una fuente E de corriente continua, permitiendo que la corriente ingrese a una fase y salga por las otras dos que están conectadas en paralelo.

El motor asíncrono cambia a movimiento síncrono, y su velocidad permanece constante bajo condiciones de carga, a menos que sufra una sobrecarga, momento en el cual sale de sincronismo y se para.

4.3 Arranque y control de velocidad de los motores de inducción

Arranque del motor de inducción trifásico:

Motor jaula de ardilla trifásico. Los motores de baja potencia tienen la capacidad de ser conectados directamente a la fuente de energía, ya que sus corrientes de arranque son lo suficientemente bajas como para no afectar de manera importante a la alimentación.

Al iniciar, estos motores utilizan una corriente que es aproximadamente de 3 a 5 veces mayor que la corriente normal, para luego disminuir rápidamente a medida que el motor toma velocidad.

Para disminuir la corriente que se produce al iniciar el motor, se puede poner en marcha con un voltaje más bajo. Esto se logra usando reóstatos o autotransformadores que están integrados en el circuito del estator. Sin embargo, al utilizar estos métodos, no solo se logra bajar la corriente de arranque, sino que también se reduce el par de arranque, ya que este depende del voltaje.

En máquinas de textiles, un inicio suave es preferible. Para disminuir el par de arranque, se conecta una resistencia, R, a uno de los tres cables de alimentación (ver figura 8).

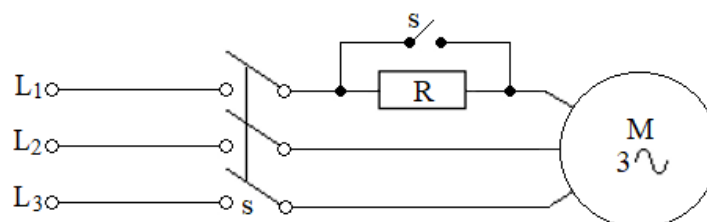


Figura 8 Reducción del par de arranque.

Al comienzo, en este conductor, la corriente disminuye, mientras que en los otros dos aumentan. Esto afecta el campo rotatorio, que se vuelve elíptico, aunque la velocidad no cambia. El par de arranque se reduce y el motor comienza a acelerar poco a poco. Cuando la fase de arranque se ha completado y el motor llega a su velocidad máxima, la resistencia se cortocircuita.

Motor trifásico con rotor devanado. El arranque de un motor trifásico que tiene un rotor de anillo se puede lograr utilizando un alto par de arranque y una corriente baja al conectar un reóstato R en el circuito del rotor (figura 9).

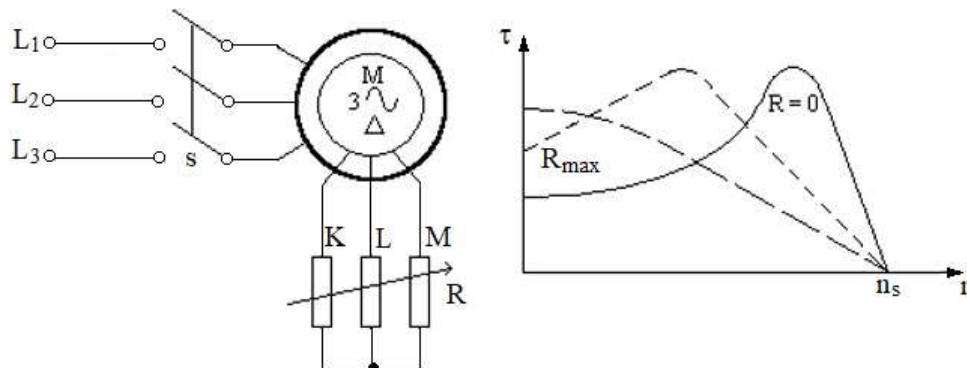


Figura 9 Par de arranque en el motor trifásico con rotor devanado.

Al inicio, se conecta el reóstato con la resistencia más alta, y a medida que el motor va acelerando, esta resistencia se va reduciendo poco a poco hasta que se corta el devanado del rotor.

Arranque estrella-delta. Los motores de inducción trifásicos, ya sea que tengan un rotor tipo jaula de ardilla o un rotor devanado que esté cortocircuitado, están diseñados para funcionar habitualmente con las fases del estator conectadas en configuración delta para la alimentación eléctrica. Para iniciar estos motores, primero se conectan los devanados del estator en forma de estrella, lo que significa que cada fase recibe un voltaje que es $1/3$ del voltaje de alimentación, y la corriente de línea se disminuye a $1/3$ del valor que se obtendría con el arranque en delta. Por lo tanto, el par de arranque es $1/3$ del que se tendría en la conexión delta, y una vez que el motor alcanza la velocidad adecuada, se conecta en delta.

Control de velocidad del motor trifásico:

El motor de inducción trifásico es, en esencia, un tipo de máquina que opera a una velocidad bastante estable. La velocidad de este motor es:

$$n = n_s (1-s) = (f/p)120 (1-s) \quad 4$$

De tal manera que se puede ajustar el control de la velocidad del motor bajo carga al cambiar:

- La frecuencia de alimentación f . El convertidor de frecuencia debe proporcionar energía al motor.
- En el motor trifásico con rotor devanado, la energía se disipa a través del reóstato del rotor.

- c) El número de polos, p. El cambio en la cantidad de polos (solamente en el motor con rotor de jaula de ardilla) se consigue mediante un devanado del estator que cuenta con seis bobinas. Estas bobinas, cuando se combinan adecuadamente, posibilitan obtener dos números de polos distintos en una relación de 1:2. En la figura 5, se puede ver cómo se realiza la conexión Dahlander, que se ilustra en la figura 10.

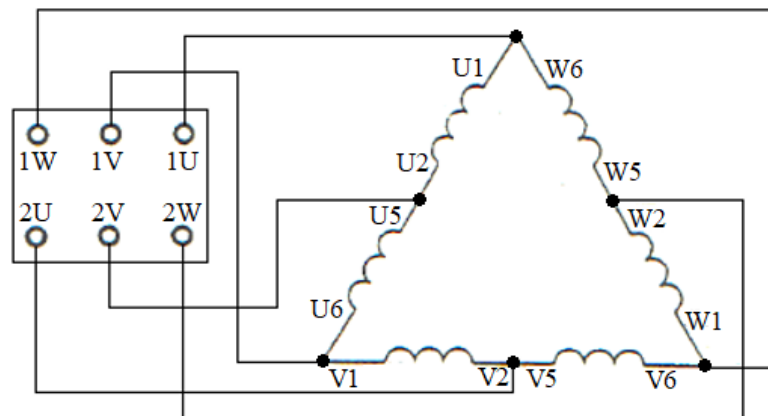


Figura 10 Conexión Dahlander.

Las bobinas están conectadas en serie y a su vez conectadas en delta.

Baja velocidad, conexión **Δ**, 4 polos (conexión **5**). Las terminales 2U, 2V, 2W permanecen libres mientras que las terminales 1W, 1V, 1U se conectan a la alimentación.

Alta velocidad, conexión **YY**, 2 polos (conexión **4**). Las terminales 1U, 1V, 1W se conectan entre éstas para formar la estrella mientras que las terminales 2U, 2V, 2W se conectan a la alimentación.

Las conexiones 4 y 5 se muestran en el complemento: Práctica 1.

Sentido de rotación. La dirección en la que giran las manecillas del reloj se refiere a cómo se mueve la aguja de la máquina, siguiendo el mismo patrón que un reloj de pulsera. Esto ocurre cuando una persona observa la máquina desde frente a la aguja más larga o desde la parte opuesta a los anillos.

El giro de un motor trifásico puede cambiarse al intercambiar la conexión de dos de sus fases de alimentación.

El sentido de giro de un motor monofásico se puede cambiar al alterar la conexión entre el devanado principal y el auxiliar.

Funcionamiento del motor de inducción. El funcionamiento del motor de inducción se puede evaluar mediante el método directo. Esto se logra al registrar las propiedades como las curvas de factor de potencia, eficiencia, corriente consumida y velocidad en función de la potencia de salida. También se considera la característica mecánica, que muestra el par en relación a la velocidad, al aplicar una carga en el eje del motor utilizando un freno.

Medición del par desarrollado por el motor de inducción. El electrodinamómetro es un dispositivo utilizado para medir con exactitud el par que generan todo tipo de motores. En esencia, funciona como un freno eléctrico que varía su fuerza de freno mediante control eléctrico, eliminando así la necesidad de fricción mecánica. Este dispositivo es más estable y más fácil de regular en comparación con los frenos que utilizan fricción mecánica.

El electrodinamómetro está formado por un rotor de jaula de ardilla y un estator. A diferencia de otros aparatos electromecánicos, este modelo permite que el estator gire, pero su movimiento está limitado por un resorte helicoidal.

Bajo condiciones de funcionamiento normales, se suministra corriente continua al devanado del estator, generando un campo magnético que atraviesa tanto el estator como el rotor. A medida que el rotor, que está conectado al motor de propulsor, gira, se produce un voltaje en las barras del rotor. Las corrientes que se generan interactúan con el campo magnético y hacen que el estator gire en la misma dirección que el rotor. Un resorte en espiral limita el movimiento del estator, y una escala fija en su carcasa muestra cuánta rotación ha tenido.

El electrodinamómetro se calibra de 0 a 27 libras fuerza-pulgadas (lb_f·plg), que es una cantidad adecuada para probar motores de ¼ de caballo de potencia (hp), incluso cuando se prueban en condiciones de sobrecarga.

La potencia de salida de un motor depende de su velocidad y el par que desarrolla, ecuación 5.

$$P = \tau \omega \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W} \quad 5$$

De manera práctica la velocidad n (rev/min o rpm) de la máquina puede obtenerse usando un tacómetro, por lo que para obtener la velocidad angular ω (rad/s) se usa la conversión 6.

$$\left(n \frac{\text{rev}}{\text{min}} \right) \left(\frac{2\pi \text{rad}}{1 \text{rev}} \right) \left(\frac{1 \text{min}}{60 \text{s}} \right) = 0.104719755 (n) \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad 6$$

El par τ (lb_f·plg) se mide usando el electrodinamómetro. La conversión 7 permite expresar el τ en N·m.

$$(\tau \text{ lb}_f \cdot \text{plg}) \left(\frac{4.4482 \text{N}}{1 \text{lb}_f} \right) \left(\frac{2.54 \text{cm}}{1 \text{plg}} \right) \left(\frac{1 \text{m}}{100 \text{cm}} \right) = 0.11298428 (\tau) \text{ N} \cdot \text{m} \quad 7$$

Ahora, usando los resultados 6 y 7 en la ecuación 5, se tiene:

$$P = [0.104719755 (n)] [0.11298428 (\tau)] = 0.011840475 (n)(\tau) \text{ W} \quad 8$$

Expresando el resultado de la ecuación 8 en hp se tiene la ecuación 9.

$$P = 0.011840475 (n)(\tau) \text{ W} \frac{1 \text{Hp}}{746 \text{W}} = 1.587195138 \times 10^{-5} (n)(\tau) \quad 9$$

$$P = \frac{1.59(n)(\tau)}{100000} \text{ Hp}$$

La relación entre la potencia mecánica que genera un motor eléctrico y la potencia eléctrica que consume se conoce como la eficiencia del motor, como se muestra en la ecuación 10.

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} 100 \quad 10$$

donde:

η eficiencia (%)
 P_m potencia mecánica (W ó hp)
 P_e potencia eléctrica, en sistemas trifásicos $P_{3f} = 3 P_{1f}$ (W)

La potencia mecánica se determina a partir del par y la velocidad necesaria, lo que significa que se refiere a la energía necesaria para mover el objeto que está unido al motor. Por otro lado, la energía eléctrica que entra se calcula utilizando el voltaje y la corriente que se proporcionan al motor.

La salida de potencia mecánica es siempre inferior a la entrada de energía eléctrica, ya que la energía se pierde durante la conversión (eléctrica a mecánica) en diversas formas, como calor y la fricción.

La gran parte de los motores eléctricos se fabrica para operar entre el 50% y el 100% de su capacidad. Usualmente, la mayor eficiencia se alcanza alrededor del 75% de esta capacidad.

4.4 Aplicaciones de los motores de inducción trifásicos

Los cuatro diseños de motores de inducción establecidos por la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA) se conocen como diseños NEMA, identificados con letras A, B, C y D. Estos diseños se refieren a las características de construcción de motores eléctricos.

Clasificación de Diseños de Motores según NEMA y algunas aplicaciones:

Diseño NEMA A: Este diseño es conocido como el «diseño general». Los motores de diseño NEMA A son motores abiertos, lo que significa que no tienen una cubierta protectora. Son adecuados para aplicaciones donde el motor está protegido de la humedad, el polvo, y no está expuesto a condiciones ambientales severas. Tiene un par de aceleración alto y una velocidad de operación relativamente baja. Esto lo hace adecuado para aplicaciones que requieren un alto par inicial, como elevadores, transportadores y máquinas herramienta.

Diseño NEMA B: Los motores de diseño NEMA B son similares a los de diseño A en términos de construcción abierta, pero tienen un ventilador o una cubierta para mejorar la refrigeración del motor. Estos motores son adecuados para aplicaciones donde se requiere una mejor disipación de calor. El diseño B tiene un par de aceleración más bajo que el diseño A, pero una velocidad de operación más alta. Esto lo hace adecuado para aplicaciones que requieren un par inicial moderado, como bombas, ventiladores y compresores. Es importante destacar que el diseño B de

motores suele funcionar de manera eficiente en la mayoría de las aplicaciones relacionadas con sistemas de calefacción, ventilación, aire acondicionado y refrigeración.

Diseño NEMA C: Los motores de diseño NEMA C son motores cerrados, lo que significa que tienen una cubierta que protege los componentes internos del motor. Estos motores son ideales para aplicaciones donde el motor está expuesto a la humedad o polvo, ya que proporcionan una mayor protección. El diseño C tiene un par de aceleración aún más bajo que el diseño B. Esto lo hace adecuado para aplicaciones que requieren un par inicial bajo, como máquinas de impresión y máquinas de embalaje.

Diseño NEMA D: Este diseño se refiere a motores cerrados y ventilados. Los motores de diseño NEMA D tienen una cubierta cerrada pero también tienen ventiladores para una mejor refrigeración del motor. Son adecuados para aplicaciones en las que se requiere una protección completa y una alta disipación de calor. El diseño D tiene un par de aceleración muy bajo y una velocidad de operación muy alta. Esto lo hace adecuado para aplicaciones que requieren un par inicial mínimo, como motores ventilador para evaporadores de refrigeración.

Clasificación	Diseño A	Diseño B	Diseño C	Diseño D
Par de aceleración	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo
Velocidad de operación	Baja	Alta	Alta	Muy alta
Aplicaciones típicas	elevadores, transportadores, máquinas herramienta	bombas, ventiladores, compresores	máquinas de impresión, máquinas de embalaje	agitadores, centrifugadoras, extrusoras, molino, ventiladores, compresores

Complementos educativos

Tema 4

Aprendizaje basado en problemas

Referencias:

Diseño del complemento:

Problema 1

“Tema 4” de la asignatura “Máquinas Eléctricas”

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

REBOBINADO • REPACRACIÓN DE AVERÍAS • MODIFICACIONES

Libro base para el diseño del complemento: Problema 1

José Manuel Puchol Vivas

Editorial Limusa

Problema 1 Análisis de los devanados desplegados

Para el diseño de este problema se utilizó el estator del motor de inducción del sistema electromecánico Mocolab De Lorenzo mostrado en la figura i.



Figura i Estator del motor de inducción del sistema electromecánico Microlab de Lorenzo.

Considere la figura ii. Para analizar los devanados desplegados de las **conexiones 1-8** anteriormente descritas es necesario suponer una convención. Considere el instante **t1** de la figura 4, la corriente instantánea $i_1(t)$ es positiva y las corrientes $i_2(t)$ e $i_3(t)$ son negativas lo que supondría que la corriente $i_1(t)$ entrara al o los devanados considerados y que las corrientes $i_2(t)$ e $i_3(t)$ salieran del devanado o los devanados considerados (puede suponerse lo contrario, los resultados son los mismos).

Tomando en cuenta la convención anterior indique las corrientes utilizando flechas en los devanados, utilice la regla de la mano derecha para definir la polaridad de los grupos de bobinas e indique N o S en el centro del grupo de bobinas considerado, analice que campos magnéticos tendrían que interactuar, defina el número de polos de la máquina y defina la velocidad sincrónica en rpm (velocidad del campo magnético giratorio).

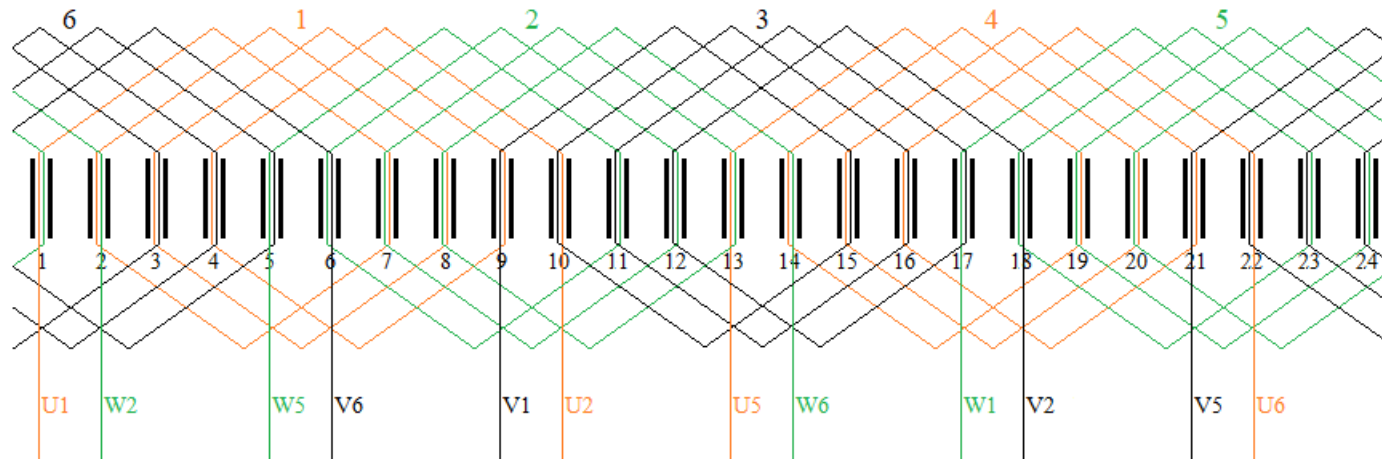


Figura ii Devanado desplegado del estator de la máquina Microlab De Lorenzo.

Problema a) Analice el devanado desplegado para la **conexión 1** utilizando para ello la figura ii, considere el instante **t1** de la figura 4.

Solución:

La figura **ia** muestra las direcciones de las corrientes en los devanados y las marcas de polaridad en los devanados. La figura **ib** muestra las direcciones de las corrientes en los devanados, una vez que las corrientes se han definido se aplica la regla de la mano derecha para determinar la polaridad en cada grupo de bobinas (por ejemplo, para el grupo de bobinas 1 un observador “ve” un sur (S) en el centro de este grupo de bobinas). Si el devanado se recorre de izquierda a derecha se puede ver que el polo norte del grupo de bobinas 6 se atrae con el polo sur del grupo de bobinas 1 definiéndose 1 polo, siguiendo con el mismo razonamiento se puede ver que en el devanado se producen 4 polos lo que implica que $n_s = 1800\text{rpm}$. Las figuras **ic** y **id** muestran un esquema simplificado para analizar las conexiones del devanado.

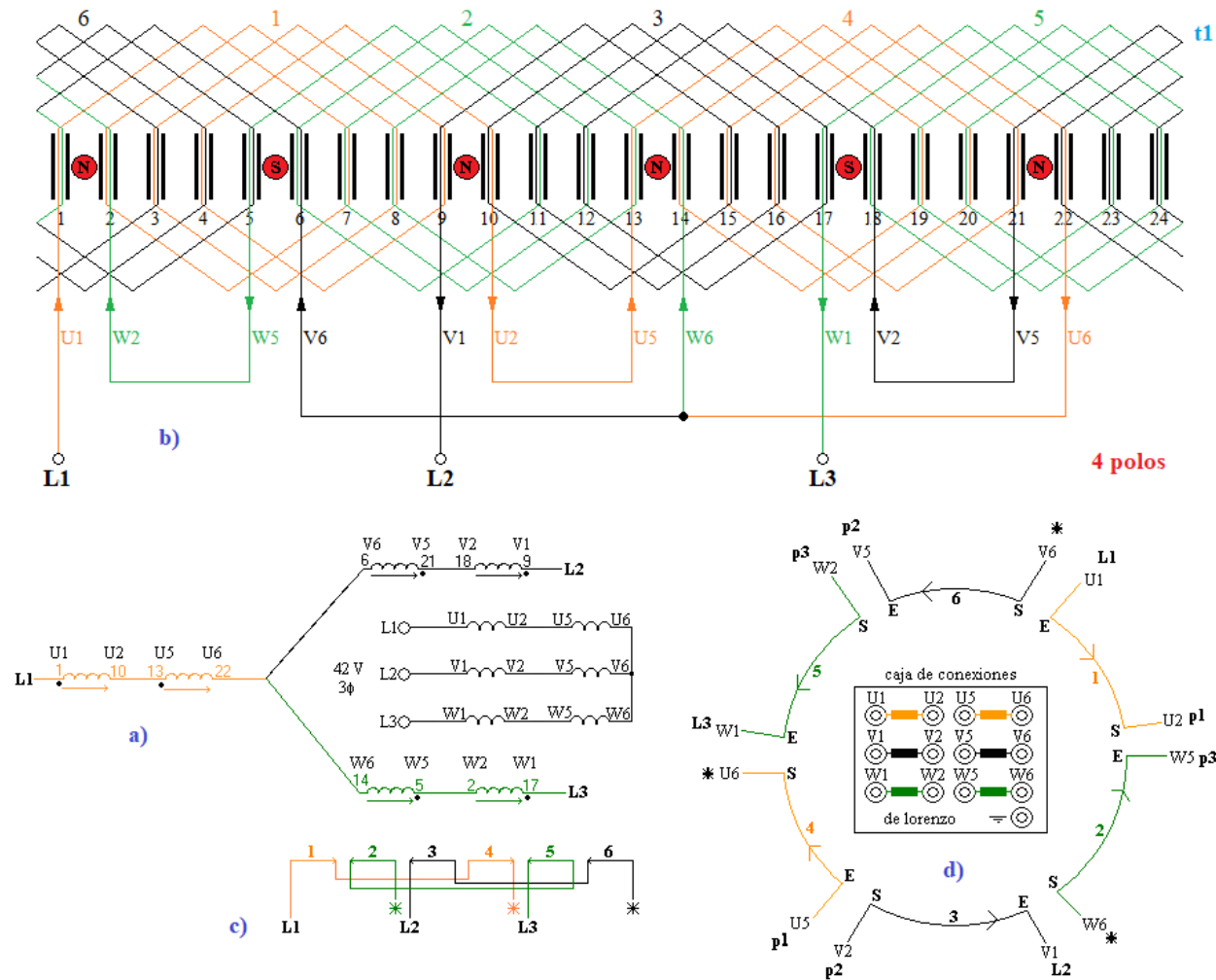


Figura 1 Análisis del devanado desplegado para la **conexión 1**. $p = 4$ y $n_s = 1800$ rpm.

Problema b) Analice el devanado desplegado para la **conexión 2** utilizando para ello la figura ii, considere el instante **t1** de la figura 4.

Solución:

La figura ii muestra los resultados para la conexión analizada.

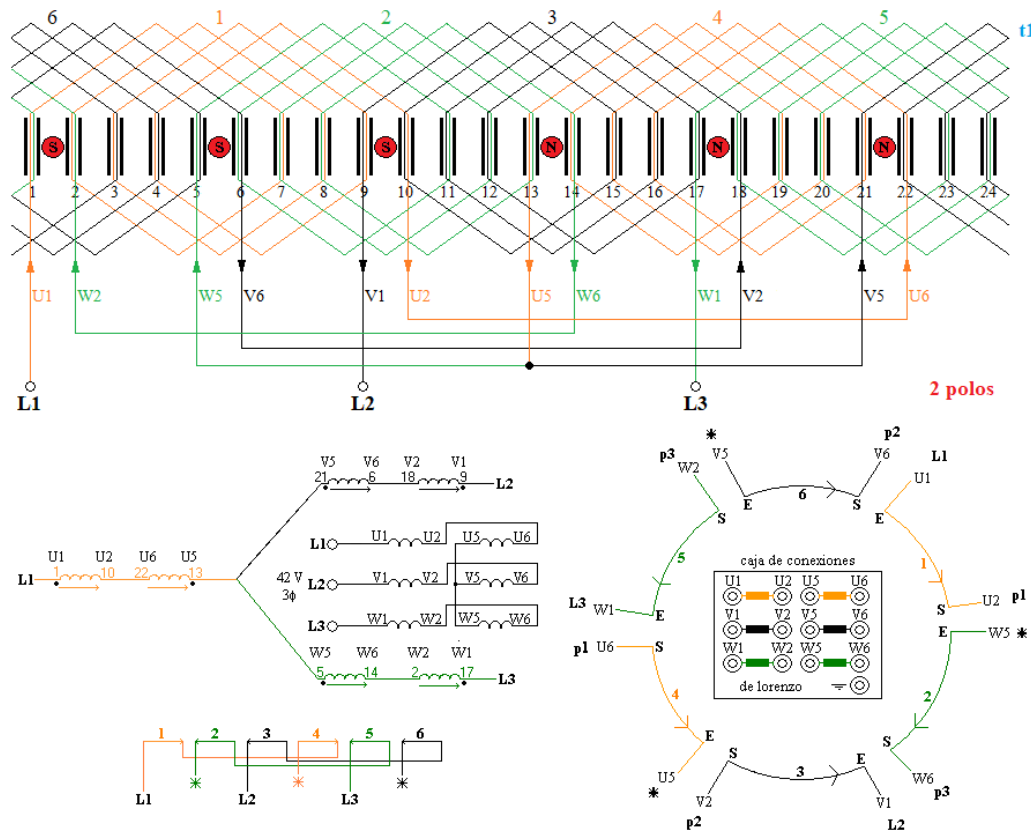


Figura ii Análisis del devanado desplegado para la **conexión 2**. $p = 2$ y $n_s = 3600\text{rpm}$.

Problema c) Analice el devanado desplegado para la **conexión 3** utilizando para ello la figura ii, considere el instante **t1** de la figura 4.

Solución:

La figura iii muestra los resultados para la conexión analizada.

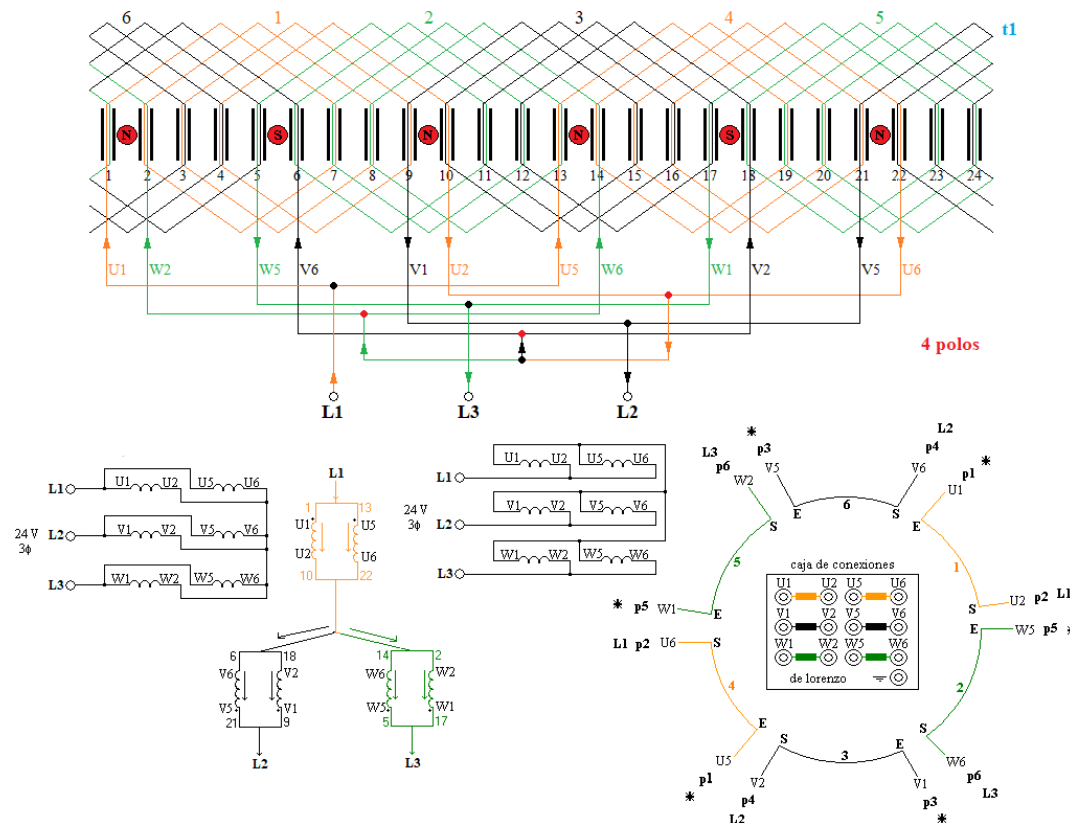


Figura iii Análisis del devanado desplegado para la **conexión 3**. $p = 4$ y $n_s = 1800\text{rpm}$.

Problema d) Analice el devanado desplegado para la **conexión 4** utilizando para ello la figura ii, considere el instante **t1** de la figura 4.

Solución:

La figura iv muestra los resultados para la conexión analizada.

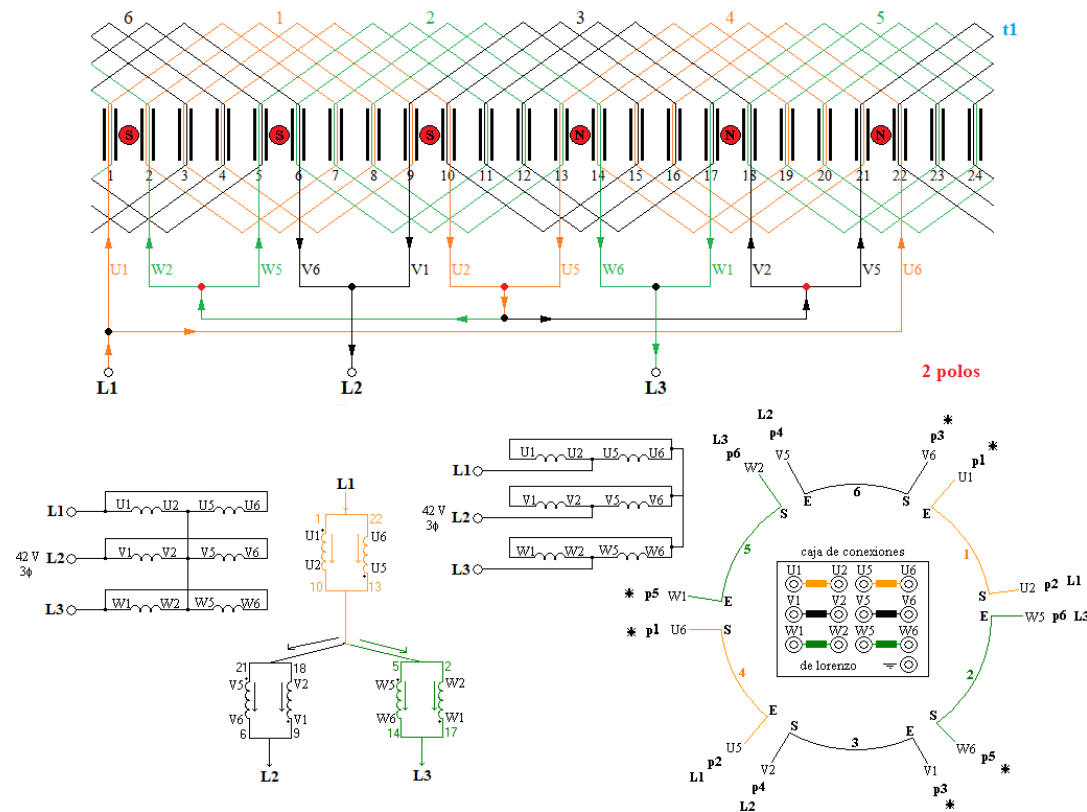


Figura iv Análisis del devanado desplegado para la **conexión 4**. $p = 2$ y $n_s = 3600\text{rpm}$.

Aprendizaje basado en retos

Referencia:

Diseño del complemento:

Reto 1, 2, 3, 4 y 5

“Tema 4” de la asignatura **“Máquinas Eléctricas”**

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Cualquier herramienta computacional se diseña en términos de un modelo matemático. La frase “analizar la herramienta computacional” se refiere que el profesor debe proponer el modelo matemático en análisis y posteriormente mediante el uso de la herramienta computacional explica que hace, de tal manera que el estudiante tiene una idea certera sobre para que sirve. La frase “construcción de la herramienta computacional” se refiere que el profesor debe proponer el modelo matemático en análisis y posteriormente el estudiante construye la herramienta computacional, obviamente el profesor revisa y corrige (si hubiera errores) el trabajo del estudiante hasta que concreta lo que el profesor ha definido como final.

Reto 1 Análisis de la herramienta computacional “campo magnético pulsante”

Esta herramienta computacional considera el tiempo y permite analizar el campo magnético pulsante (campo magnético producido por una bobina).

El diseño de la herramienta computacional se muestra en las figuras [vii](#), [viii](#) y [ix](#), estas figuras muestran el gráfico en función del tiempo considerando las funciones $e(t)$ e $i_{amp}(t)$ y el valor instantánea de la tensión y la corriente, el primer diagrama fasorial muestra el defasamiento entre tensión y corriente, el segundo diagrama fasorial muestra el fasor $\mathbf{I}_m$ y sus componentes fasoriales, el tercer diagrama fasorial muestra la posición del vector intensidad de campo magnético $\mathbf{H}$ y sus componentes vectoriales (giratorio izquierdo y giratorio derecho) y el cuarto diagrama fasorial muestra el tercer diagrama fasorial girado en términos del ángulo α . El cuarto diagrama fasorial permite entender que la bobina produce en un punto P de su eje un campo magnético $\mathbf{H}$ que tiene siempre la misma dirección pero presenta amplitud variable y sentido de acuerdo al valor instantáneo de corriente.

Como se puede ver en los diagramas tres y cuatro de las figuras [vii](#), [viii](#) y [ix](#), el campo magnético pulsante se puede tratar como la combinación de dos campos magnéticos de fuerza constante que son cada uno la mitad de H_M , girando en direcciones opuestas a la misma velocidad. Esto sucede en el periodo correspondiente a la corriente alterna. Los campos en rotación se representan con los vectores $\mathbf{H}_i$ (que gira a la izquierda) y $\mathbf{H}_d$ (que gira a la derecha), los cuales producen un campo resultante $\mathbf{H}$ que se mantiene en una dirección fija y varía entre un valor máximo positivo $H_i + H_d = H_M$ ($\alpha = 0^\circ$) y un valor máximo negativo $-(H_i + H_d) = -H_M$ ($\alpha = 180^\circ$), llegando a ser nulo en el ángulo $\alpha = 90^\circ$.

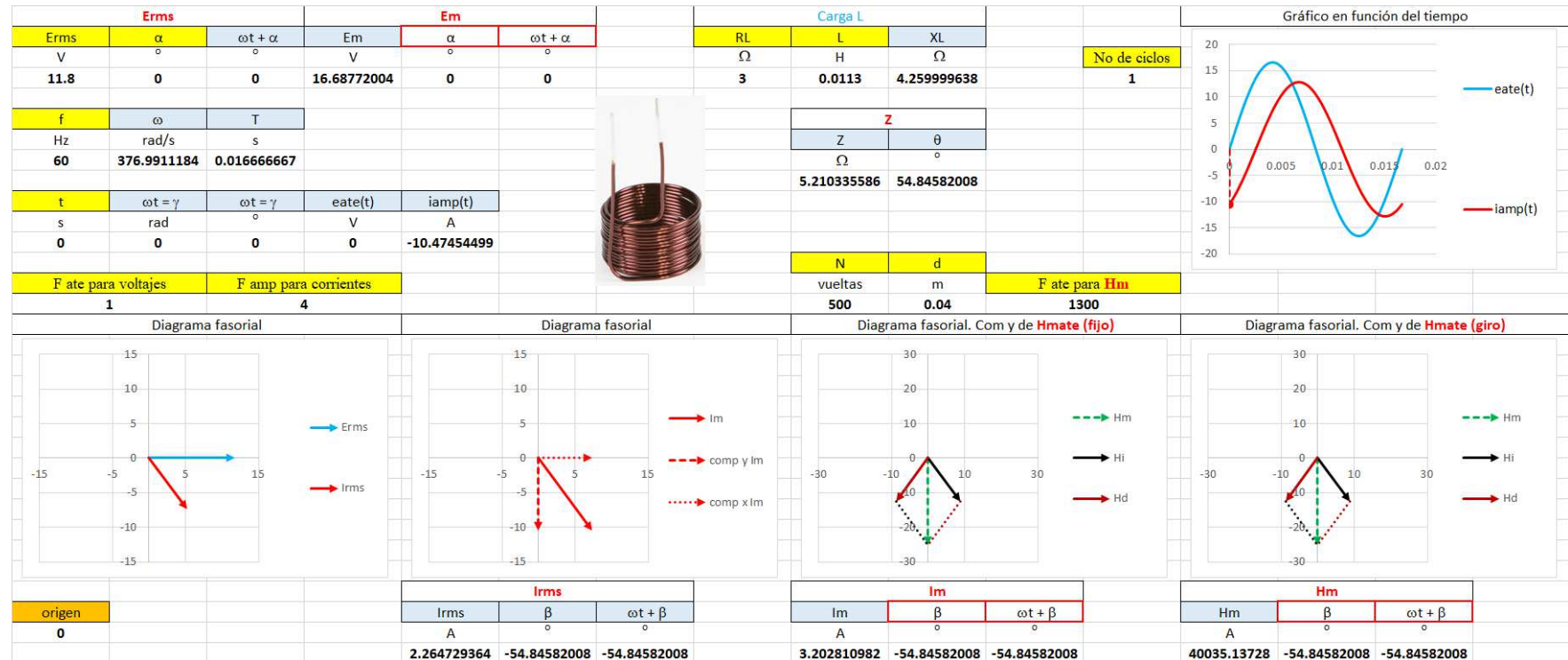


Figura vii Campo magnético pulsante, $t = 0s$, $\alpha = 0^\circ$.

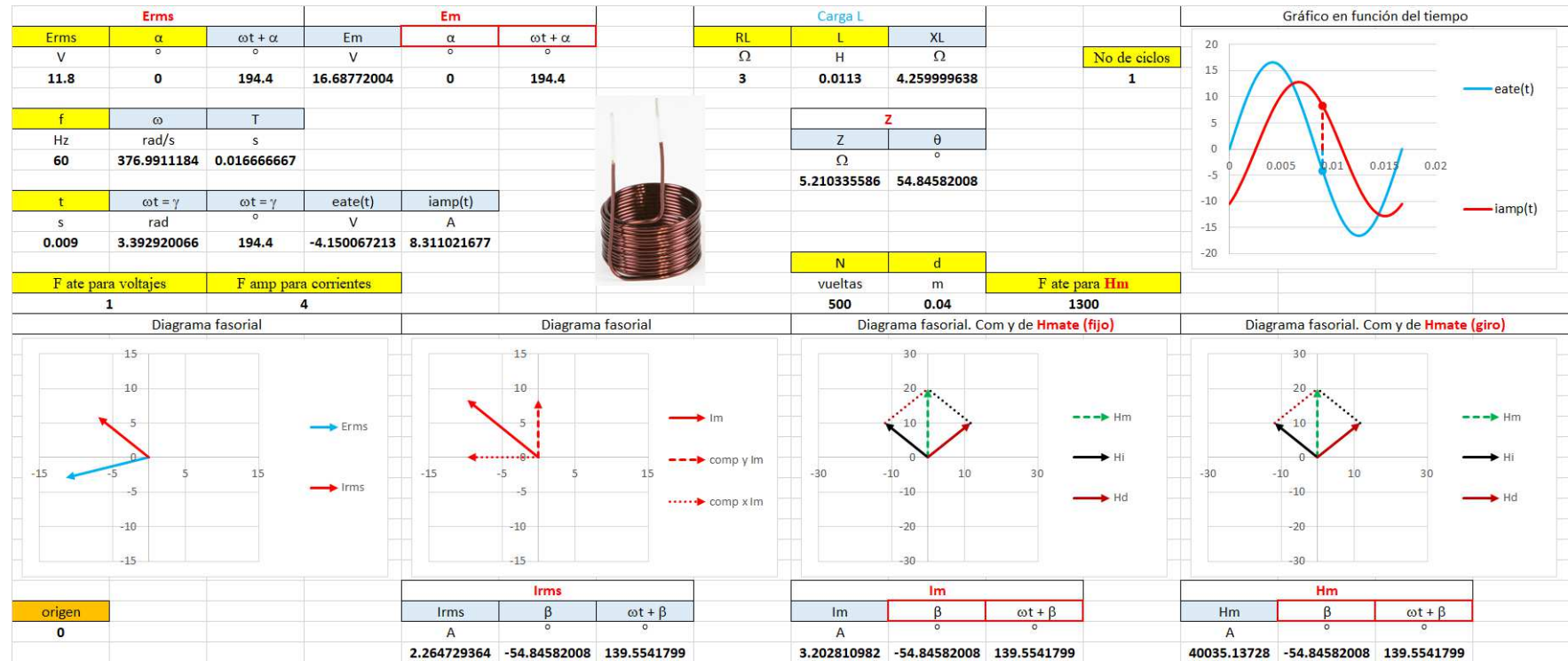


Figura viii Campo magnético pulsante, $t = 0.009s$, $\alpha = 0^\circ$.

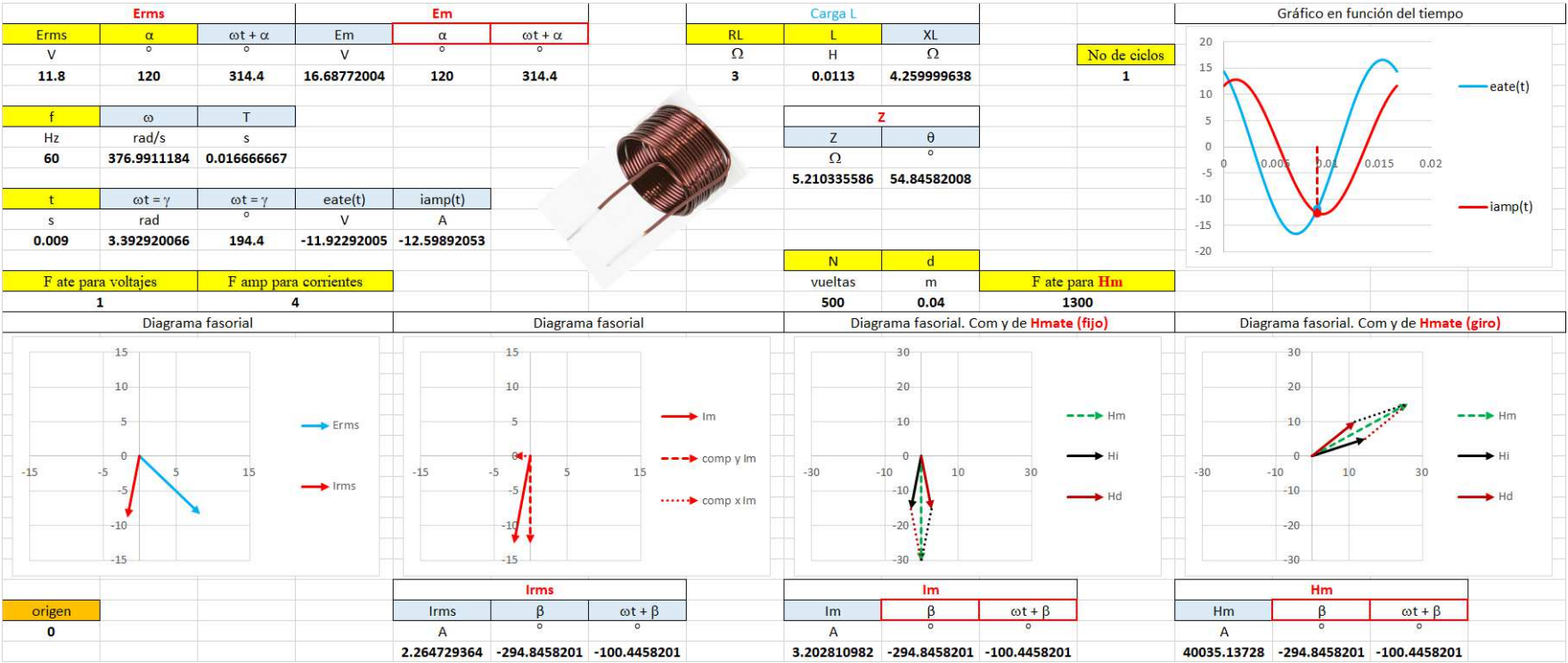


Figura ix Campo magnético pulsante, $t = 0.009s$, $\alpha = 120^\circ$.

	dato
	valor calculado
	el dato se pasa de la misma hoja

Reto 2 Análisis de la herramienta computacional “campo magnético giratorio trifásico”

Esta herramienta computacional considera el tiempo y permite analizar el campo magnético giratorio trifásico.

El cuarto diagrama fasorial de las figuras vii, viii y ix muestran la posición del vector intensidad de campo magnético $\mathbf{H}$ y sus componentes vectoriales (giratorio izquierdo y giratorio derecho), esta posición corresponde con el ángulo α que define la posición de la bobina. Lo anterior permite considerar un sistema trifásico (figura x) para analizar el campo magnético giratorio trifásico, cada bobina produce un campo magnético pulsante y la interacción de estos campos magnéticos pulsantes permite analizar y determinar la producción del campo magnético giratorio trifásico.

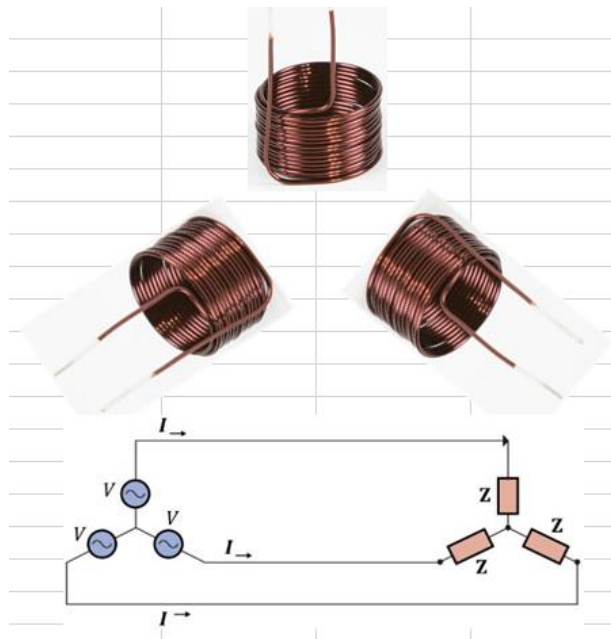


Figura x Sistema trifásico para analizar el campo magnético giratorio trifásico.

El diseño de la herramienta computacional se muestra en la figura xi. El caso mostrado corresponde con un sistema trifásico balanceado en donde la secuencia de fase es positiva. El diagrama fasorial “Fa” muestra el campo magnético pulsante producido por la bobina conectada a la fase a, el diagrama fasorial “Fb” muestra el campo magnético pulsante producido por la bobina conectada a la fase b y El diagrama fasorial “Fc” muestra el campo magnético pulsante producido por la bobina conectada a la fase c. El diagrama fasorial “campo magnético giratorio” muestra cómo interactúan estos tres campos magnéticos pulsantes, como puede observarse las tres bobinas generan en el origen tres campos magnéticos $\mathbf{H}_{ma}$, $\mathbf{H}_{mb}$ y $\mathbf{H}_{mc}$ que alcanzan la misma intensidad H_M cíclicamente en el tiempo de un tercio de periodo. Cada uno de estos tres vectores $\mathbf{H}_{ma}$, $\mathbf{H}_{mb}$ y $\mathbf{H}_{mc}$ es dividido en sus vectores componentes, las componentes rotatorias $\mathbf{H}_{ai}$, $\mathbf{H}_{bi}$ y $\mathbf{H}_{ci}$ dan una resultante nula debido a que éstas tienen la misma intensidad pero están defasadas 120° , las componentes rotatorias a la derecha $\mathbf{H}_{ad}$, $\mathbf{H}_{bd}$ y $\mathbf{H}_{cd}$ resultan por el contrario paralelas entre éstas y dan como resultante un vector $\mathbf{H}$ cuya amplitud es igual a la suma $H = H_{ad} + H_{bd} + H_{cd}$.

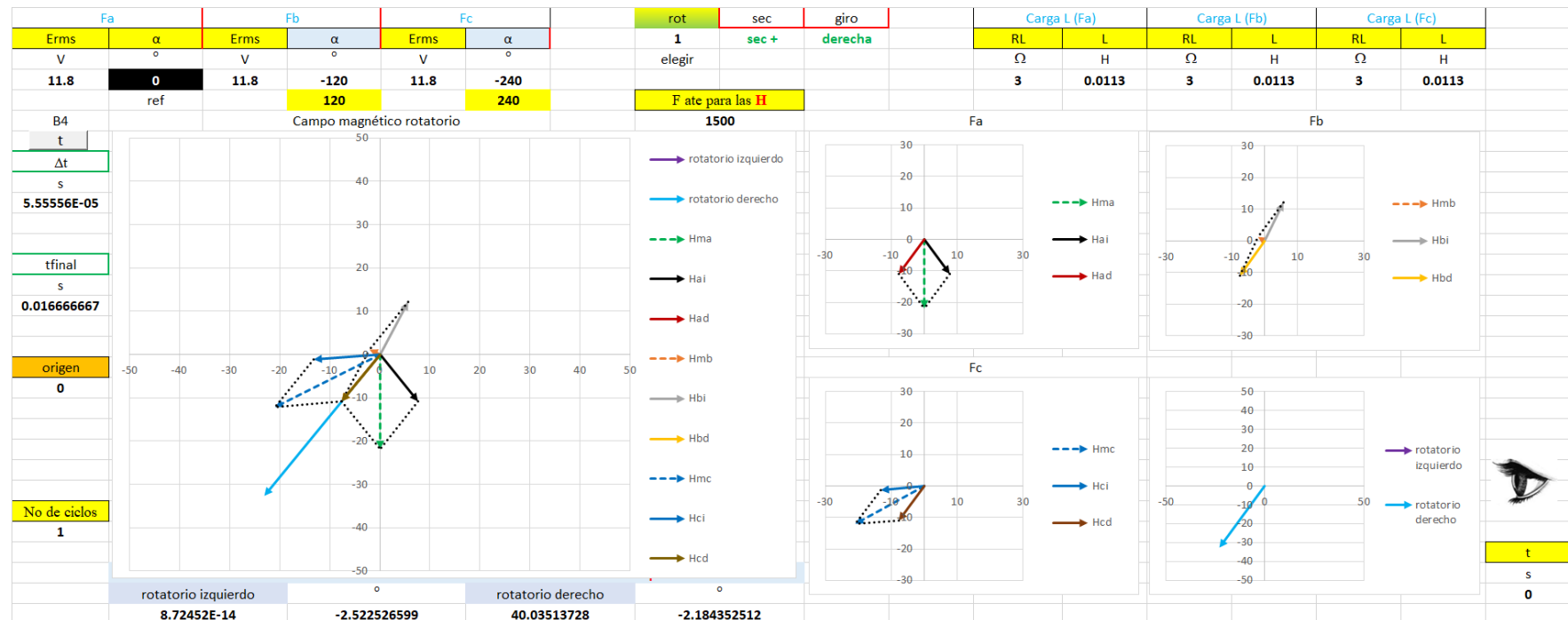
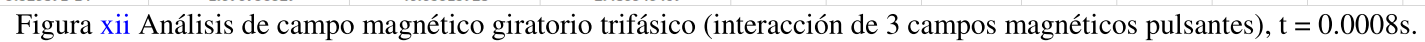


Figura xi Análisis de campo magnético giratorio trifásico (interacción de 3 campos magnéticos pulsantes), $t = 0s$.

Al aplicar el mismo razonamiento en otros momentos (figuras xii y xiii), las componentes rotatorias a la izquierda siempre producirán una suma que será nula. Por lo tanto, el vector resultante $\mathbf{H}$ se formará únicamente por la suma de las componentes rotatorias a la derecha, que siempre son paralelas entre sí. Además, dado que $H_i = H_d = (1/2)H_M$, el vector resultante del campo magnético tendrá una magnitud $H = 3H_d = (3/2)H_M$, y este se moverá en el plano en sentido de la rotación a la derecha (como las agujas del reloj) con una velocidad angular constante. El botón “B4” ajusta automáticamente el tiempo en incrementos de 5.55556E-05s, lo que facilita la simulación del campo magnético rotativo trifásico a lo largo del tiempo para el número de ciclos establecido.



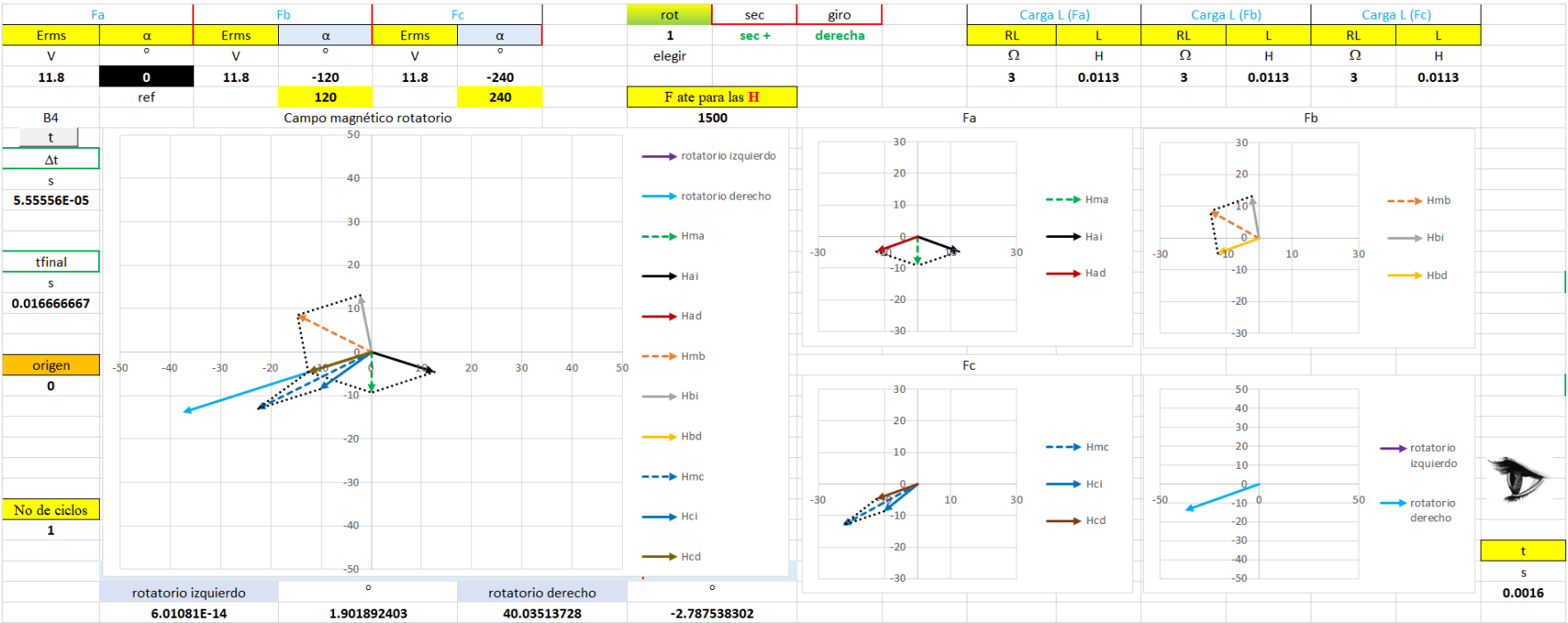


Figura xiii Análisis de campo magnético giratorio trifásico (interacción de 3 campos magnéticos pulsantes), $t = 0.0016s$.

La herramienta computacional permite analizar el campo magnético giratorio para sistemas monofásicos, bifásicos y trifásicos.

Reto 3 Construcción de la herramienta computacional “determinación del dato de placa del motor de inducción trifásico y características electromecánicas”

Esta herramienta computacional permite determinar el dato de placa de un motor de inducción trifásico y sus características electromecánicas y para su diseño se utilizó el motor de inducción del sistema electromecánico Leybold Didactic mostrado en la figura [xiv](#).



Figura [xiv](#) Motor de inducción del sistema electromecánico Leybold Didactic.

El diseño de la herramienta computacional se muestra en las tablas [1](#) y [2](#). La tabla [1](#) muestra los valores que deben medirse y la tabla [2](#) muestra los valores calculados usando los valores de la tabla [1](#).

Tabla [1](#) Valores medidos. Motor de inducción Leybold Didactic Conexión Y.

f							
Hz							
	τ	E_L	I_L	P_{lf}	Q_{lf}	f_p	n
Medición	N·m	V	A	W	var	adimensional	rpm
1	0						
2	0.2						
3	0.4						
4	0.6						
5	0.8						
6	1						
7	1.2						
8	1.4						
9	1.6						
10	1.8						
11	2						
12	2.2						
13	2.4						
14	2.6						
15	2.8						
16	3						

[illegible]

	valor medido
	valor propuesto
	valor calculado
	el dato se pasa de la misma hoja

Tabla 3 Dato de placa propuesto. Conexión Y.

E	I	P _m	fp	f	n
V	A	W		Hz	rpm

Ingeniería Eléctrica
336

Reto 4 Análisis de la herramienta computacional “corrección del factor de potencia para cargas pasivas y activas monofásicas”

Esta herramienta computacional considera el tiempo y permite corregir el factor de potencia para cargas monofásicas inductivas pasivas y activas. La base de esta herramienta computacional está definida en el **complemento educacional aprendizaje basado en retos: Reto 1 Tema 1**.

El diseño de la herramienta computacional se muestra en la figura **xv**, **xvi**, **xviii** y **xix**.

La figura **xv** muestra el comportamiento de una carga monofásica inductiva pasiva (se puede elegir el tipo de carga: pasiva o activa). En el caso de la carga pasiva la resistencia de la carga se calcula mediante el factor Rc y en el caso de la carga activa se propone la condición de operación del motor de inducción monofásico, se mide P, Q e I y mediante la ley de ohm ($P = I^2 R$, $Q = I^2 X$) se calcula la resistencia de la carga (Re **Zc**) y la reactancia de la carga (Im **Zc**).

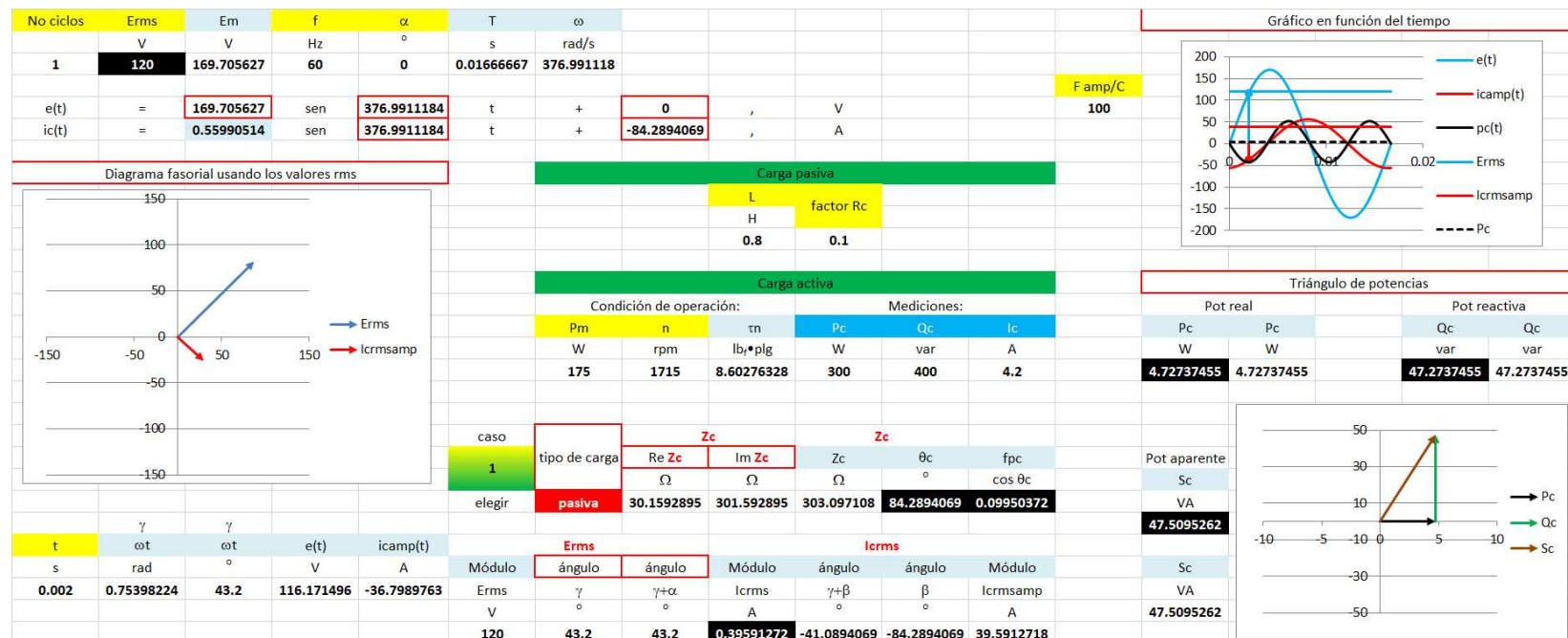


Figura **xv** Comportamiento de la carga monofásica inductiva pasiva para $t = 0.002s$.

La figura xvi muestra el cálculo del capacitor a conectar en paralelo con la carga para que el factor de potencia deseado sea 0.5 inductivo utilizando 3 métodos. El primer método emplea la ecuación $i_{[1]}$, el segundo método emplea los triángulos de potencia y el tercer método emplea tablas.

$$X_1 = \frac{R_{\text{carga}}^2 + X_{\text{carga}}^2}{R_{\text{carga}} \tan[\cos^{-1} \text{fp}_{\text{deseado}}] - X_{\text{carga}}}$$

“Tan[cos⁻¹ fp] es positiva si el fp está en atraso y negativa si el fp está en adelanto”

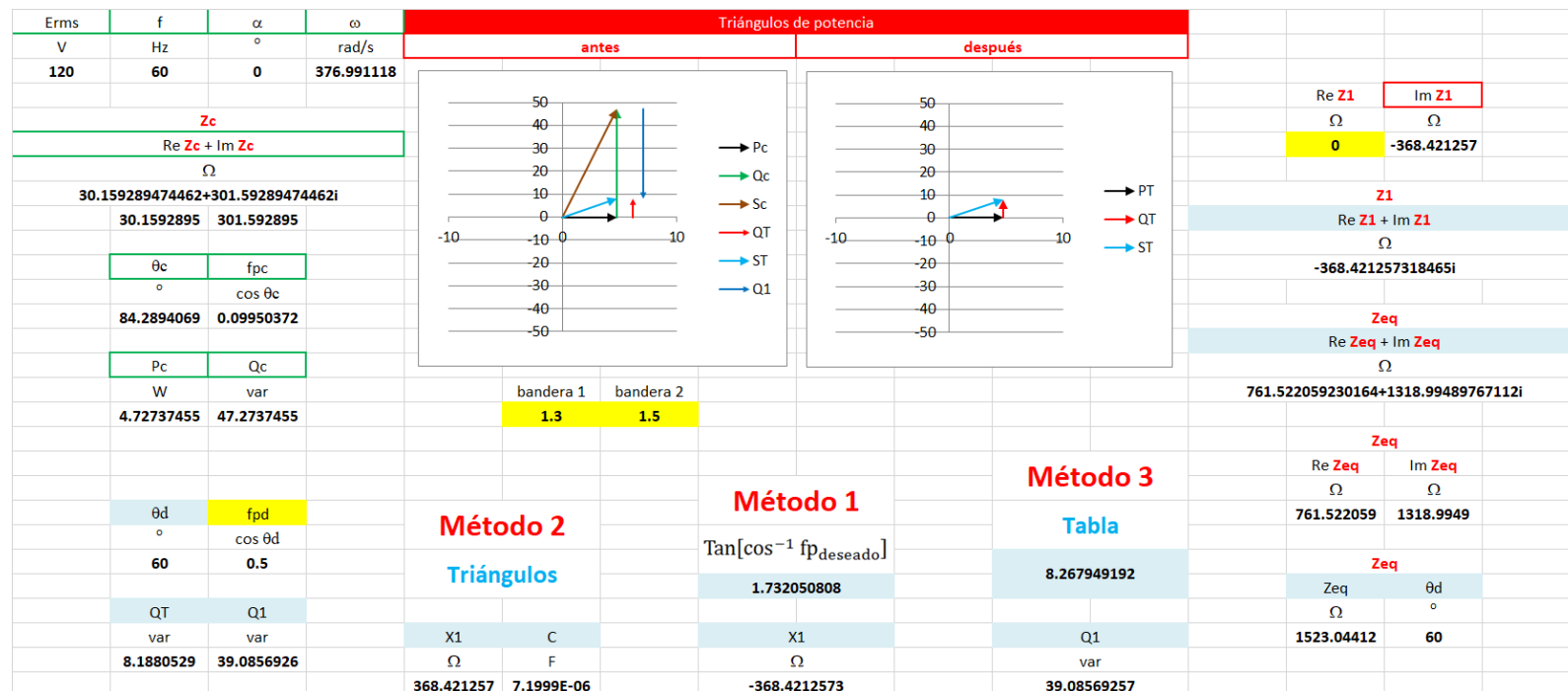


Figura xvi Cálculo del capacitor a conectar en paralelo con la carga para que el factor de potencia deseado sea 0.5 inductivo.

[1]ANÁLISIS BÁSICO DE CIRCUITOS ELECTRICOS,
Johnson-Hilburn-Johnson,
Prentice-Hall.

[illegible]Ingeniería Eléctrica
339

No ciclos	Erms	Em	f	α	T	ω
	V	V	Hz	$^\circ$	s	rad/s
1	120	169.705627	60	0	0.01666667	376.9911184

e(t)	=	169.705627	sen	376.9911184	t	+	0	,	V
i1(t)	=	0.4606293	sen	376.9911184	t	+	90	,	A

Diagrama fasorial usando los valores rms

Comportamiento del capacitor

Z1		Z1		fp1	
Re Z1	Im Z1	Z1	$\theta 1$	$\cos \theta 1$	
Ω	Ω	Ω	$^\circ$		
0	-368.421257	368.421257	-90	6.1257E-17	

Erms			I1rms		
Módulo	ángulo	ángulo	Módulo	ángulo	ángulo
Erms	γ	$\gamma + \alpha$	I1rms	$\gamma + \beta$	β
V	$^\circ$	$^\circ$	A	$^\circ$	$^\circ$
120	43.2	43.2	0.3257141	133.2	90

t	γ	γ	e(t)	i1amp(t)
s	rad	$^\circ$	V	A
0.002	0.75398224	43.2	116.171496	33.57843118

Pot aparente	
S1	S1
VA	VA
39.0856926	39.0856926

Gráfico en función del tiempo

Triángulo de potencias

Figura **xix** Comportamiento del capacitor (**Z1**) para $t = 0.002s$.

La herramienta computacional permite corregir el factor de potencia para el circuito equivalente sea inductivo o capacitivo.

Reto 5 Análisis de la herramienta computacional “el controlador de potencia reactiva con corrección del factor de potencia”

Para comprender el proceso de compensación de potencia reactiva usando el controlador de potencia reactiva con corrección del factor de potencia para una carga inductiva analice el siguiente ejemplo.

Ejemplo:

Considere el caso $E_{Lrms} = 440V$, $I_{Lrms} = 183A$, $fp = 0.77$ inductivo y $f = 60Hz$. Este factor de potencia puede mejorarse a 0.9 inductivo. Se muestra el diagrama del círculo (diagrama fasorial del proceso de compensación) para el análisis del proceso de compensación de potencia reactiva (corrección del factor de potencia), considerando un transformador de corriente $TC = 250/5$ y un controlador de potencia reactiva el cual opera sobre 8 bloques de capacitores de 10kvar cada uno.

Paso 1 Se calcula la potencia reactiva Q_{3f} necesaria para que el factor de potencia sea el deseado.

Procedimiento a) La figura xx muestra dos triángulos de potencias (se emplearon valores trifásicos). El primer triángulo corresponde a la condición de operación de la máquina sin capacitores y el segundo triángulo corresponde a la operación de la máquina conectando $Q_{3f\text{capacitor}} = 36974.312\text{var}$ necesarios para que el factor de potencia sea el deseado.

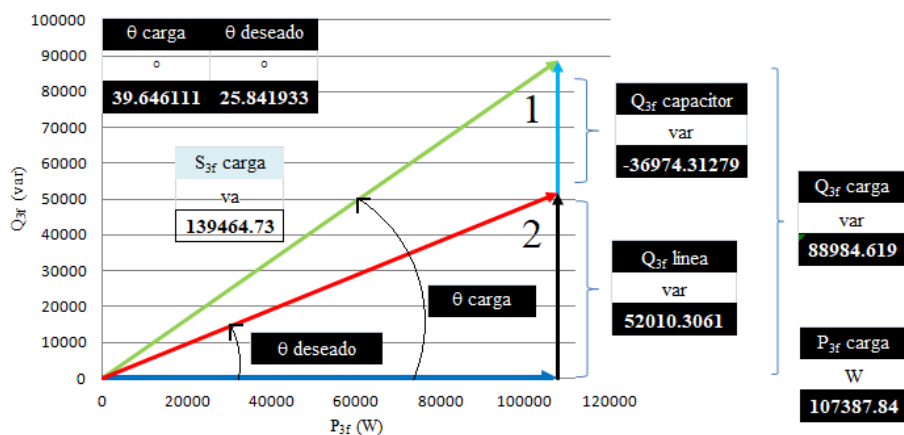


Figura xx Triángulos de potencias.

Procedimiento b) Para determinar la potencia reactiva Q_{3f} capacitor necesaria para la corrección del factor de potencia, basta con localizar el factor de potencia actual y localizar el factor de potencia deseado en la tabla 4 para determinar el valor donde confluyen ambos valores, este valor (0.345) se multiplica por la potencia activa P_{3f} carga, para obtener el Q_{3f} capacitor. La tabla 5 muestra el cálculo de los factores de la tabla 4; así, para el caso analizado el valor exacto donde confluyen ambos valores es 0.344306318, por lo que la potencia reactiva trifásica necesaria $Q_{3f\text{capacitor}} = -36974.312\text{var}$. Por lo tanto, 4 capacitores de 10kvar cada uno a 440V son suficientes para que el factor de potencia sea el deseado.

Tabla 4 Tabla para corregir el factor de potencia^[2] y ^[3].

fp actual	fp deseado																			
	0.7	0.75	0.8	0.82	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.9	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1
0.2	3.88	4.02	4.15	4.19	4.28		4.33			4.41		4.46		4.51	4.57	4.59		4.69		4.9
0.25	2.85	2.99	3.12	3.17	3.25		3.32			3.38		3.45		3.5	3.54	3.58		3.66		3.87
0.3	2.16	2.3	2.43	2.48	2.56		2.62			2.69		2.75		2.81	2.85	2.88		2.97		3.18
0.35	1.66	1.79	1.93	1.98	2.06		2.12			2.19		2.25		2.31	2.5	2.38		2.47		2.68
0.4	1.27	1.41	1.54	1.59	1.67		1.72			1.8		1.86		1.93	1.96	2		2.08		2.29
0.42	1.14	1.28	1.41	1.46	1.54		1.59			1.68		1.74		1.8	1.83	1.87		1.95		2.16
0.44	1.02	1.16	1.29	1.34	1.42		1.47			1.56		1.62		1.67	1.71	1.75		1.83		2.04
0.46	0.91	1.05	1.18	1.23	1.31		1.36			1.45		1.5		1.56	1.6	1.64		1.72		1.93
0.48	0.8	0.95	1.08	1.13	1.2		1.26			1.33		1.4		1.47	1.49	1.54		1.61		1.82
0.5	0.71	0.85	0.98	1.03	1.11		1.18			1.25		1.31		1.37	1.4	1.44		1.52		1.73
0.52	0.62	0.76	0.89	0.94	1.02		1.08			1.16		1.22		1.28	1.31	1.35		1.43		1.64
0.54	0.5	0.68	0.81	0.86	0.94		0.99			1.07		1.13		1.19	1.23	1.2		1.35		1.56
0.56	0.46	0.6	0.73	0.78	0.86		0.91			1		1.05		1.12	1.15	1.18		1.27		1.48
0.58	0.38	0.52	0.65	0.7	0.78		0.85			0.92		0.98		1.04	1.07	1.11		1.19		1.4
0.6	0.31	0.45	0.58	0.64	0.71		0.78			0.85		0.91		0.98	1.01	1.05		1.13		1.34
0.62	0.24	0.38	0.52	0.57	0.65		0.7			0.78		0.84		0.9	0.93	0.97		1.06		1.26
0.64	0.18	0.32	0.45	0.5	0.58		0.63			0.72		0.77		0.83	0.87	0.9		0.99		1.2
0.66	0.12	0.26	0.39	0.44	0.52	0.545	0.57	0.598	0.626	0.654	0.682	0.709	0.743	0.775	0.809	0.847	0.887	0.935	0.996	1.138
0.67					0.488	0.515	0.541	0.568	0.596	0.624	0.652	0.679	0.713	0.745	0.779	0.817	0.857	0.905	0.966	1.108
0.68	0.06	0.2	0.33	0.38	0.46	0.486	0.512	0.539	0.567	0.595	0.623	0.65	0.684	0.716	0.75	0.788	0.828	0.876	0.937	1.079
0.69					0.429	0.456	0.482	0.509	0.537	0.565	0.593	0.62	0.654	0.686	0.72	0.758	0.798	0.84	0.907	1.049
0.7		0.14	0.27	0.32	0.4	0.427	0.453	0.48	0.508	0.536	0.564	0.591	0.625	0.657	0.691	0.729	0.769	0.811	0.878	1.02
0.71					0.372	0.399	0.425	0.452	0.48	0.508	0.536	0.563	0.597	0.629	0.663	0.701	0.741	0.783	0.85	0.992
0.72		0.08	0.21	0.27	0.34	0.37	0.396	0.423	0.451	0.479	0.507	0.538	0.568	0.6	0.634	0.672	0.712	0.754	0.821	0.963
0.73					0.316	0.343	0.369	0.396	0.424	0.452	0.48	0.507	0.541	0.573	0.607	0.645	0.685	0.727	0.794	0.936
0.74		0.03	0.16	0.21	0.29	0.316	0.342	0.369	0.397	0.425	0.453	0.48	0.514	0.546	0.58	0.616	0.658	0.7	0.767	0.909
0.75					0.262	0.289	0.315	0.342	0.37	0.398	0.426	0.453	0.487	0.519	0.553	0.591	0.631	0.673	0.74	0.882
0.76			0.1	0.16	0.24	0.262	0.288	0.315	0.343	0.371	0.399	0.426	0.46	0.492	0.526	0.564	0.604	0.652	0.713	0.855
0.77					0.209	0.236	0.262	0.289	0.317	0.345	0.373	0.4	0.434	0.466	0.5	0.538	0.578	0.62	0.687	0.829
0.78			0.05	0.1	0.18	0.21	0.236	0.263	0.291	0.319	0.347	0.374	0.408	0.44	0.474	0.512	0.552	0.594	0.661	0.803
0.79					0.156	0.183	0.209	0.236	0.264	0.292	0.32	0.347	0.381	0.413	0.447	0.485	0.525	0.567	0.634	0.776
0.8				0.05	0.13	0.157	0.183	0.21	0.238	0.266	0.294	0.321	0.355	0.387	0.421	0.459	0.499	0.541	0.608	0.75
0.81					0.104	0.131	0.157	0.184	0.212	0.24	0.268	0.295	0.329	0.361	0.395	0.433	0.473	0.515	0.582	0.724
0.82					0.08	0.105	0.131	0.158	0.186	0.214	0.242	0.269	0.303	0.335	0.369	0.407	0.447	0.489	0.556	0.698
0.83					0.052	0.079	0.105	0.132	0.16	0.188	0.212	0.243	0.277	0.309	0.343	0.381	0.421	0.463	0.53	0.672
0.84					0.03	0.053	0.079	0.106	0.134	0.162	0.19	0.217	0.251	0.283	0.317	0.355	0.395	0.437	0.504	0.645
0.85					0	0.027	0.053	0.08	0.106	0.136	0.164	0.191	0.225	0.257	0.291	0.329	0.369	0.417	0.478	0.62
0.86							0.026	0.053	0.081	0.109	0.137	0.167	0.198	0.23	0.265	0.301	0.343	0.39	0.451	0.543
0.87								0.027	0.055	0.082	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.317	0.364	0.425	0.567
0.88									0.028	0.056	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211	0.248	0.29	0.337	0.398	0.54
0.89										0.028	0.056	0.086	0.117	0.149	0.183	0.22	0.262	0.309	0.37	0.512
0.9											0.028	0.058	0.089	0.121	0.155	0.192	0.234	0.281	0.342	0.484
0.91												0.03	0.061	0.093	0.127	0.164	0.206	0.253	0.314	0.456
0.92													0.031	0.063	0.097	0.134	0.176	0.223	0.284	0.426
0.93														0.032	0.066	0.103	0.145	0.192	0.253	0.395
0.94															0.034	0.071	0.113	0.16	0.221	0.363
0.95																0.037	0.079	0.126	0.187	0.328
0.96																			0.09	0.28
0.98																				0.21

^[2]GUÍA RÁPIDA PARA CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA,

RTC Manufacturados con Capacitores, General Electric

^[3]CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA CON CAPACITORES,

Catálogo BJ 90 – 01 SP, Asea Brown Boveri Equipos y Sistemas

Tabla 5 Cálculo de los factores de la tabla 4 para corregir el factor de potencia.

	0.71	0.72	0.73	0.74	0.75	0.76	0.77	0.78	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00		
0.600	0.3415	0.3635	0.3371	0.3781	0.4244	0.4514	0.4782	0.5047	0.5311	0.5572	0.5833	0.6093	0.6353	0.6613	0.6874	0.7136	0.7400	0.7666	0.7936	0.8210	0.8490	0.8777	0.9073	0.9381	0.9704	1.0046	1.0417	1.0827	1.1303	1.1908	1.3333	
0.605	0.3242	0.3522	0.3378	0.3971	0.4432	0.4609	0.4874	0.5138	0.5400	0.5661	0.5921	0.6181	0.6441	0.6701	0.6961	0.7227	0.7493	0.7763	0.8038	0.8318	0.8605	0.8901	0.9208	0.9531	0.9874	1.0244	1.0655	1.1150	1.1736	1.3161		
0.610	0.3072	0.3352	0.3628	0.3901	0.4171	0.4433	0.4704	0.4967	0.5223	0.5490	0.5750	0.6010	0.6270	0.6531	0.6793	0.7057	0.7323	0.7593	0.7867	0.8147	0.8434	0.8730	0.9038	0.9361	0.9703	1.0074	1.0484	1.0960	1.1565	1.2390		
0.615	0.2903	0.3183	0.3453	0.3732	0.4002	0.4270	0.4535	0.4793	0.5061	0.5322	0.5582	0.5842	0.6102	0.6362	0.6624	0.6888	0.7154	0.7424	0.7698	0.7978	0.8265	0.8562	0.8869	0.9192	0.9535	0.9905	1.0315	1.0791	1.1397	1.2822		
0.620	0.2737	0.3016	0.3293	0.3566	0.3836	0.4103	0.4369	0.4632	0.4894	0.5155	0.5415	0.5675	0.5935	0.6196	0.6457	0.6721	0.6986	0.7257	0.7532	0.7812	0.8093	0.8395	0.8703	0.9025	0.9366	0.9738	1.0149	1.0624	1.1200	1.2655		
0.625	0.2572	0.2851	0.3128	0.3401	0.3671	0.3938	0.4204	0.4467	0.4729	0.4990	0.5250	0.5510	0.5770	0.6031	0.6293	0.6556	0.6823	0.7093	0.7367	0.7647	0.7934	0.8230	0.8538	0.8860	0.9203	0.9573	0.9984	1.0453	1.1065	1.2490		
0.630	0.2409	0.2688	0.2965	0.3238	0.3508	0.3773	0.4041	0.4304	0.4566	0.4827	0.5087	0.5347	0.5607	0.5868	0.6128	0.6393	0.6660	0.6929	0.7204	0.7484	0.7771	0.8067	0.8375	0.8697	0.9040	0.9410	0.9821	1.0236	1.0902	1.2327		
0.635	0.2247	0.2527	0.2805	0.3076	0.3346	0.3615	0.3879	0.4143	0.4405	0.4666	0.4926	0.5186	0.5446	0.5706	0.5966	0.6232	0.6498	0.6768	0.7042	0.7322	0.7609	0.7906	0.8213	0.8536	0.8873	0.9243	0.9651	1.0135	1.0741	1.2166		
0.640	0.2088	0.2367	0.2644	0.2917	0.3187	0.3454	0.3720	0.3983	0.4245	0.4506	0.4766	0.5026	0.5286	0.5546	0.5808	0.6072	0.6339	0.6608	0.6883	0.7163	0.7450	0.7746	0.8054	0.8376	0.8719	0.9089	0.9500	0.9975	1.0581	2.006		
0.645	0.1923	0.2209	0.2486	0.2759	0.3029	0.3296	0.3562	0.3825	0.4087	0.4348	0.4608	0.4868	0.5128	0.5388	0.5650	0.5914	0.6181	0.6450	0.6725	0.7005	0.7292	0.7588	0.7896	0.8218	0.8561	0.8931	0.9342	0.9817	1.0423	1.1848		
0.650	0.1773	0.2053	0.2323	0.2602	0.2872	0.3134	0.3405	0.3668	0.3930	0.4191	0.4451	0.4711	0.4971	0.5232	0.5494	0.5758	0.6024	0.6294	0.6568	0.6848	0.7135	0.7431	0.7733	0.8062	0.8404	0.8775	0.9185	0.9661	1.0266	1.1691		
0.655	0.1618	0.1836	0.2174	0.2447	0.2717	0.2985	0.3250	0.3514	0.3775	0.4036	0.4296	0.4556	0.4816	0.5077	0.5339	0.5603	0.5863	0.6133	0.6413	0.6693	0.6980	0.7276	0.7584	0.7907	0.8248	0.8620	0.9030	0.9506	1.0111	1.1536		
0.660	0.1464	0.1744	0.2021	0.2294	0.2564	0.2831	0.3097	0.3360	0.3622	0.3883	0.4143	0.4403	0.4663	0.4923	0.5185	0.5443	0.5706	0.5985	0.6260	0.6540	0.6827	0.7123	0.7431	0.7753	0.8096	0.8466	0.8877	0.9352	0.9958	1.1383		
0.665	0.1312	0.1532	0.1868	0.2141	0.2412	0.2673	0.2944	0.3208	0.3470	0.3731	0.3991	0.4251	0.4511	0.4771	0.5033	0.5297	0.5563	0.5833	0.6108	0.6388	0.6673	0.6971	0.7281	0.7601	0.7944	0.8314	0.8724	0.9200	0.9806	1.1231		
0.670	0.1162	0.1441	0.1718	0.1991	0.2261	0.2528	0.2794	0.3057	0.3319	0.3580	0.3840	0.4100	0.4360	0.4621	0.4883	0.5146	0.5413	0.5683	0.5957	0.6237	0.6524	0.6820	0.7128	0.7451	0.7793	0.8163	0.8574	0.9049	0.9655	1.1080		
0.675	0.1012	0.1232	0.1566	0.1841	0.2111	0.2379	0.2644	0.2908	0.3170	0.3431	0.3691	0.3951	0.4211	0.4471	0.4733	0.4997	0.5263	0.5533	0.5807	0.6087	0.6374	0.6671	0.6978	0.7301	0.7644	0.8014	0.8424	0.8900	0.9506	1.0931		
0.680	0.0864	0.1144	0.1420	0.1693	0.1963	0.2231	0.2496	0.2760	0.3022	0.3283	0.3543	0.3802	0.4062	0.4323	0.4585	0.4843	0.5115	0.5385	0.5659	0.5939	0.6226	0.6523	0.6830	0.7153	0.7496	0.7866	0.8272	0.8752	0.9358	1.0783		
0.685	0.0717	0.0997	0.1273	0.1546	0.1816	0.2084	0.2349	0.2613	0.2875	0.3136	0.3396	0.3656	0.3916	0.4176	0.4438	0.4702	0.4968	0.5238	0.5513	0.5793	0.6080	0.6376	0.6683	0.7006	0.7349	0.7719	0.8126	0.8605	0.9211	1.0636		
0.690	0.0572	0.0851	0.1128	0.1401	0.1671	0.1938	0.2204	0.2467	0.2729	0.2990	0.3250	0.3510	0.3770	0.4031	0.4293	0.4556	0.4823	0.5093	0.5367	0.5647	0.5934	0.6230	0.6538	0.6860	0.7203	0.7573	0.7984	0.8459	0.9065	1.0490		
0.695	0.0427	0.0707	0.0983	0.1256	0.1526	0.1794	0.2053	0.2323	0.2585	0.2845	0.3106	0.3365	0.3625	0.3886	0.4148	0.4412	0.4678	0.4948	0.5222	0.5502	0.5789	0.6085	0.6393	0.6716	0.7059	0.7429	0.7833	0.8315	0.8921	1.0345		
0.700	0.0284	0.0564	0.0840	0.1113	0.1383	0.1650	0.1916	0.2179	0.2441	0.2702	0.2962	0.3222	0.3483	0.3743	0.4005	0.4268	0.4535	0.4805	0.5079	0.5359	0.5646	0.5942	0.6250	0.6573	0.6915	0.7285	0.7696	0.8171	0.8777	1.0202		
0.705	0.0141	0.0421	0.0697	0.0970	0.1241	0.1508	0.1773	0.2037	0.2293	0.2560	0.2820	0.3080	0.3340	0.3600	0.3862	0.4126	0.4392	0.4662	0.4937	0.5216	0.5504	0.5800	0.6107	0.6430	0.6773	0.7143	0.7553	0.8023	0.8635	1.0060		
0.710	0.0000	0.0280	0.0556	0.0829	0.1093	0.1357	0.1632	0.1896	0.2157	0.2418	0.2678	0.2938	0.3198	0.3453	0.3721	0.3985	0.4251	0.4521	0.4795	0.5075	0.5362	0.5658	0.5966	0.6289	0.6631	0.7002	0.7412	0.7886	0.8493	0.9918		
0.715		0.0139	0.0416	0.0693	0.0959	0.1226	0.1492	0.1755	0.2017	0.2278	0.2538	0.2798	0.3058	0.3319	0.3581	0.3844	0.4111	0.4381	0.4655	0.4935	0.5222	0.5516	0.5826	0.6149	0.6491	0.6861	0.7272	0.7747	0.8353	0.9778		
0.720		0.0000	0.0276	0.0543	0.0819	0.1087	0.1352	0.1616	0.1878	0.2139	0.2399	0.2658	0.2918	0.3179	0.3441	0.3705	0.3971	0.4241	0.4515	0.4795	0.5082	0.5379	0.5686	0.6003	0.6332	0.6722	0.7192	0.7668	0.8284	0.9339		
0.725			0.0138	0.0411	0.0681	0.0948	0.1214	0.1477	0.1739	0.2000	0.2260	0.2520	0.2780	0.3041	0.3303	0.3566	0.3833	0.4103	0.4377	0.4657	0.4944	0.5240	0.5548	0.5870	0.6213	0.6583	0.6994	0.7463	0.8075	0.9500		
0.730			0.0000	0.0273	0.0543	0.0811	0.1076	0.1339	0.1601	0.1862	0.2122	0.2382	0.2642	0.2903	0.3165	0.3429	0.3695	0.3965	0.4239	0.4519	0.4806	0.5102	0.5410	0.5733	0.6075	0.6446	0.6856	0.7332	0.7937	0.9362		
0.735				0.0136	0.0406	0.0674	0.0933	0.1203	0.1465	0.1725	0.1986	0.2245	0.2505	0.2766	0.3028	0.3292	0.3558	0.3828	0.4102	0.4382	0.4669	0.4965	0.5273	0.5596	0.5939	0.6309	0.6719	0.7195	0.7800	0.9225		
0.740					0.0000	0.0270	0.0538	0.0803	0.1066	0.1328	0.1589	0.1849	0.2109	0.2369	0.2630	0.2892	0.3156	0.3422	0.3692	0.3966	0.4246	0.4533	0.4823	0.5137	0.5460	0.5802	0.6173	0.6583	0.7059	0.7664	0.9089	
0.745						0.0135	0.0402	0.0668	0.0931	0.1193	0.1454	0.1714	0.1974	0.2234	0.2495	0.2756	0.3020	0.3287	0.3556	0.3831	0.4111	0.4398	0.4694	0.5002	0.5324	0.5667	0.6037	0.6448	0.6923	0.7529	0.8954	
0.750							0.0000	0.0268	0.0533	0.0796	0.1058	0.1319	0.1579	0.1839	0.2099	0.2360	0.2622	0.2886	0.3152	0.3422	0.3696	0.3976	0.4263	0.4559	0.4867	0.5190	0.5532	0.5893	0.6383	0.6789	0.7394	0.8819

=SI((TAN(ACOS(0.6))-TAN(ACOS(0.71)))<0,"", (TAN(ACOS(0.6))-TAN(ACOS(0.71))))

	0.71
0.6	0.3415

Paso 2 La figura **xxi** muestra el diagrama del círculo (diagrama fasorial del proceso de compensación) para el ejemplo en análisis.

Considerando el **procedimiento b** del **paso 1**, la potencia reactiva necesaria para que el factor de potencia sea 1 es $Q_{3\text{capacitor}} = -88984.618\text{var}$. Por lo tanto 8 bloques de capacitores de 10kvar cada uno no harían que el factor de potencia sea 1, sin embargo el factor de potencia deseado sí. El valor $Q_{3\text{carga}} = 88984.618\text{var}$ se toma como referencia para trazar el diagrama del círculo (diagrama fasorial del proceso de compensación) y calcular ángulos y corrientes.

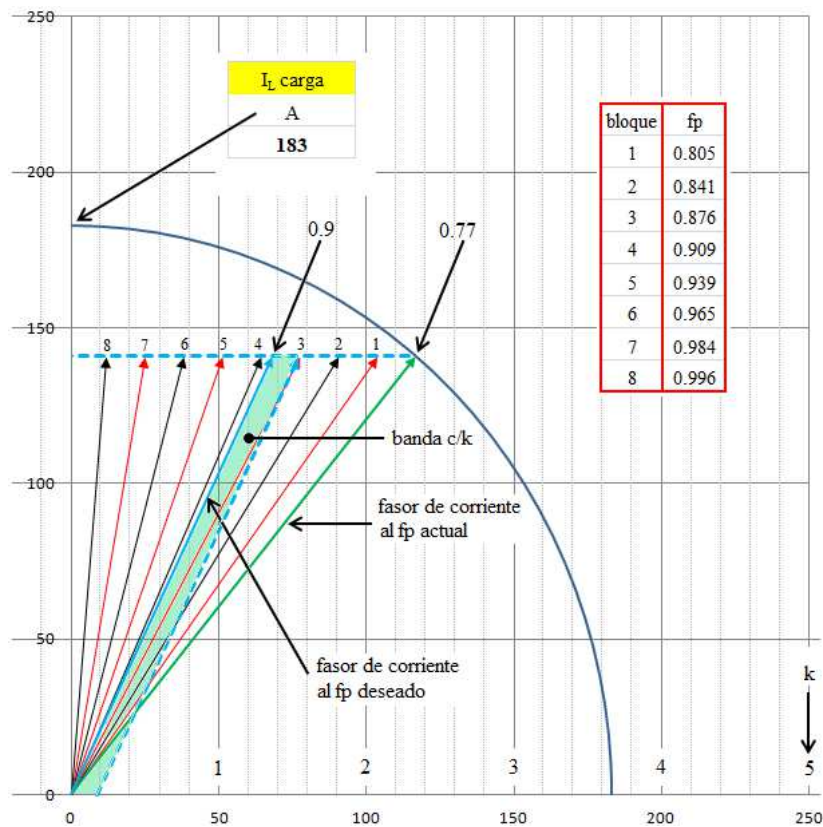


Figura **xxi** Diagrama del círculo para el ejemplo (diagrama fasorial del proceso de compensación).

El operador c/k se obtiene usando la ecuación **ii**.

$$\frac{c}{k} = 0.66 \left[\frac{Q_c}{\sqrt{3} E k} \right], \quad A \quad ii$$

donde:

El factor k es relativo a la razón de transformación del transformador de corriente requerido para la medición de corriente.

Q_c es la potencia reactiva del capacitor de menor valor en kvar.

E es el voltaje de la red en kV.

El control de ajuste $\cos \theta$ en el panel frontal del controlador sirve para ajustar el valor deseado del factor de potencia, fp .

Por lo tanto $c/k = 0.173$. El factor 0.66 es el propuesto por el fabricante del equipo mostrado en la figura xxii.

La tabla 6 muestra como mejora el fp a medida que los bloques de capacitores se conectan al sistema. El fasor de corriente compleja al factor de potencia actual está fuera de la banda c/k . La conexión del primer bloque de capacitores mejora el factor de potencia a 0.805 inductivo, la suma del segundo bloque de capacitores mejora el factor de potencia a 0.841 inductivo, la suma del tercer bloque de capacitores mejora el factor de potencia a 0.876 inductivo. El fasor de corriente compleja está fuera de la banda c/k , de modo que el controlador de potencia reactiva conecta el cuarto bloque de capacitores mejorando el factor de potencia a 0.909 inductivo, sin embargo el controlador de potencia reactiva mide una sobrecompensación en esta combinación de bloques de capacitores teniéndose una potencia reactiva capacitiva, por lo que el led “CAP.” enciende y, desconecta el bloque de capacitores 1, ahora el controlador de potencia reactiva registra una componente de potencia reactiva inductiva y el led “IND” enciende y otra vez conecta el primer bloque de capacitores, ciclándose el proceso. Para que el proceso de compensación termine es necesario ampliar el valor del operador c/k (ajuste de sensibilidad) para que el fasor de corriente compleja esté dentro de la banda c/k , de modo que el controlador de potencia reactiva alcance el valor fijado y el proceso termine. El fasor de corriente compleja se ha reducido 22.23321A con la combinación de tres bloques de capacitores. Como puede verse, el fp con el que concluye el proceso “no” es el deseado.

Tabla 6 Compensación de potencia reactiva.

	Q_{3f} capacitor	Q_{3f} Línea	θ Línea	fp Línea	I_L Línea
Combinación	var	var	°		A
1	10000	78984.618	36.334	0.805	174.919
2	20000	68984.618	32.716	0.841	167.479
3	30000	58984.618	28.778	0.876	160.766
4	40000	48984.618	24.519	0.909	154.877
5	50000	38984.618	19.952	0.939	149.907
6	60000	28984.618	15.104	0.965	145.952
7	70000	18984.618	10.025	0.984	143.095
8	80000	8984.618	4.782	0.996	141.402

Si en el controlador de potencia se fija el valor del fp en 1 se requieren 5 bloques de capacitores más, las cuales solo cambian el fasor de corriente 19.364A más. La disminución de corriente alienta al cliente a instalar un sistema poderoso relativamente caro.

En el ejemplo se ha asumido que el proceso de compensación mejora usando bloques de capacitores idénticos. Sin embargo, los controladores modernos ofrecen la posibilidad de 15 deferentes capacitancias totales con cuatro capacitancias individuales con diferentes valores (bloques de capacitores). Esta posibilidad puede bajar el costo del equipo de compensación de potencia reactiva y, al mismo tiempo, mejora las características de control por acortamiento de los pasos de compensación.

“Si el controlador de potencia reactiva está en modo de operación manual, no ocurre el proceso de control, esto ocurre solo cuando el controlador de potencia reactiva es puesto en modo automático”

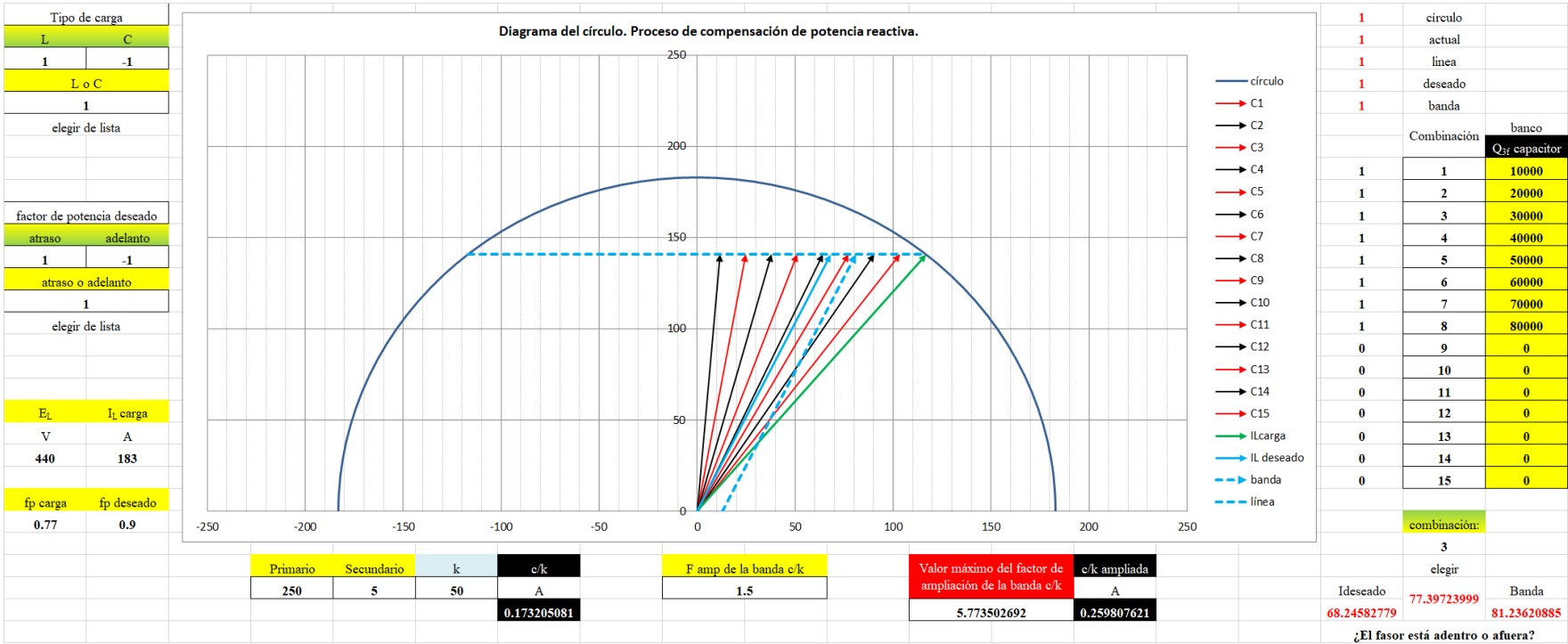
Esta herramienta computacional permite comprender el proceso de compensación de potencia reactiva mediante el uso del controlador de potencia reactiva con corrección del factor de potencia y para su diseño se utilizó el controlador de potencia reactiva del equipo Leybold Didactic mostrado en la figura xxii.



Figura xxii Controlador de potencia reactiva con corrección del factor de potencia del equipo Leybold Didactic.

El diseño de la herramienta computacional se muestra en la figura xxiii y xxiv. La figura xxiii muestra los resultados de la figura xxi y en la figura xxiv se amplía la banda c/k ajustando el valor a 0.259807621 para que el proceso de compensación termine en la combinación 3.





Rúbrica para evaluar las prácticas de laboratorio

Portada

La portada debe contener:

1. Nombre de la institución
2. Carrera
3. Número y nombre la práctica
4. Nombre de los estudiantes
5. Nombre del profesor
6. Fecha de entrega

En el encabezado aparece mi nombre, esto es así porque un servidor diseño la propuesta. Cuando ustedes envíen su documento deberán quitar mi nombre e incluir el encabezado (si desean incluirlo), pie de página (si desean incluirlo), logotipos (si desean incluirlos).

Objetivos

Incluir los objetivos indicados en la práctica.

Introducción

Lo que se indique en la práctica.

20%

Material y equipo

Incluir la lista indicada en la práctica mencionando las especificaciones técnicas del equipo.

Discusión de resultados:

Al reportar resultados calculados de las prácticas de laboratorio deben utilizar 3 cifras de precisión.

1 Deben respetar la propuesta metodológica de la práctica para mostrar resultados sin tener que repetir la redacción de los procedimientos y sin mostrar los circuitos eléctricos.

30%

2 Deben hacer observaciones (2 o más por objetivo) de los experimentos propuestos en los procedimientos (*esta redacción es en equipo*). Estas observaciones se indican en cada objetivo.

10%

Conclusiones

Deben incluir conclusiones por objetivos y son individuales.

Cada conclusión debe ser redactada en un párrafo de 5 renglones completos (el espaciamento, tamaño y tipo de letra a considerar es: espacio sencillo, 10 arial o times new roman).

La conclusión es una redacción técnica haciendo referencia a la introducción, ecuaciones, cálculos y comportamientos gráficos.

20%

Demostración práctica

Deben redactar en cada objetivo (sin incluir diagramas eléctricos, cálculos, etc) que fue lo que se hizo y que interpretas de la demostración práctica del objetivo (*esta redacción es en equipo*). Cada demostración práctica debe ser redactada en un párrafo de 8 renglones completos (el espaciamento, tamaño y tipo de letra a considerar es: espacio sencillo, 10 arial o times new roman). Esta sección depende de lo que haga un servidor en las demostraciones prácticas ejecutadas en el laboratorio.

20%

Aprendizaje basado en prácticas de laboratorio

Práctica 1

Análisis preliminar del motor de inducción trifásico y conexiones trifásicas

Para esta práctica se emplea el **complemento: Reto 1 y 2**.

Objetivos:

- 1 Analizar el campo magnético giratorio trifásico producido por un motor de inducción trifásico elemental.
- 2 Verificar la producción del campo magnético giratorio trifásico por medio de corrientes trifásicas.
- 3 Invertir el sentido de rotación de un campo magnético giratorio trifásico mediante la variación de la secuencia de fase.
- 4 Conexiones trifásicas.

Introducción:

La figura a muestra el estator trifásico didáctico para bobinar motores trifásicos jaula de ardilla.

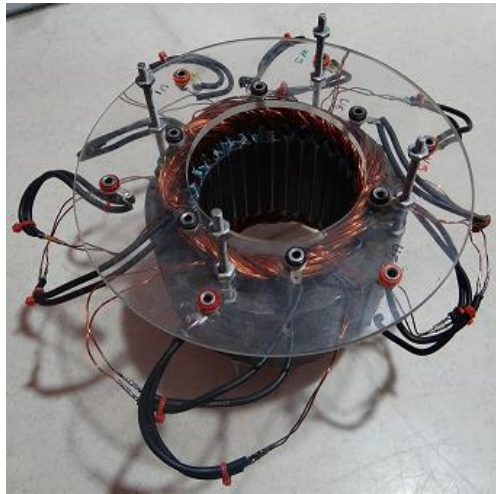


Figura a Estator trifásico didáctico para bobinar motores trifásicos jaula de ardilla.

Lleve a cabo las siguientes actividades:

- a) Obtenga el dato del devanado y bobine el estator.
- b) Muestre 5 fotografías de las actividades ejecutadas con relación al bobinado y
- c) Verifique que el devanado produce el campo magnético giratorio introduciendo un balín suspendido de algún sistema mecánico (puede utilizarse también una punta magnética o un bote giratorio) en el interior del estator (el balín o punta magnética o bote debe girar).

Material y equipo necesario:

Equipo Lab-Volt:

- 1 Módulo de suministro de potencia EMS821

Equipo Microlab De Lorenzo:

1 Motor de inducción trifásico jaula de ardilla

Equipo ULE:

1 Regulador de tensión de inducción Mod. ULE 821

Otros:

1 Prototipo “Estator trifásico didáctico para bobinar”

1 Prototipo “Motor de inducción trifásico elemental” (proyecto de asignatura)

1 Máquina bobinadora

1 Interruptor 1 tiro 3 polos

1 Balín

1 Bote

1 Tacómetro

2 Multímetro

1 Ampérmetro de ca

1 Ampérmetro de gancho

Nota: El motor de inducción elemental es el proyecto de asignatura. Este complemento educacional inicia al finalizar el tema 1 y se propone para obtener la calificación del examen escrito del **Tema 4**. El proyecto de asignatura a desarrollar para esta propuesta de trabajo es un prototipo de un motor de inducción trifásico elemental. El proyecto de asignatura se presenta al finalizar el tema 4.

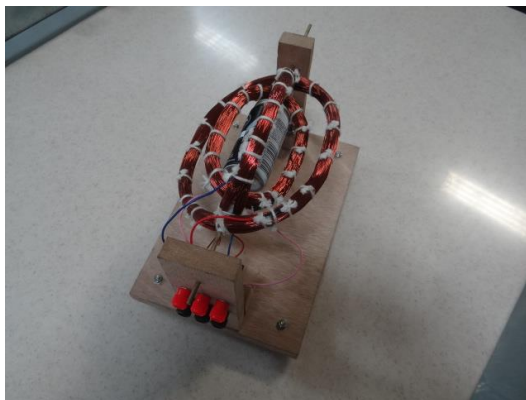
Metodología:

Observación:

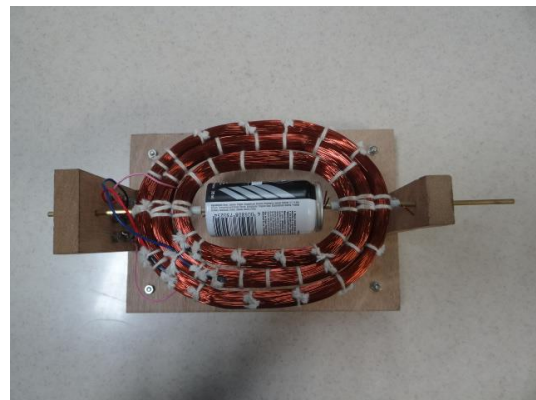
1 Para el objetivo 1 use el módulo de suministro de potencia EMS8821.

Objetivo 1

a) La figura **b** muestra el motor de inducción trifásico elemental (proyecto de asignatura).



a



b

Figura **b** Prototipo “Motor de inducción trifásico elemental” (proyecto de asignatura).

a1) Coloque las bobinas como se muestra en la figura **ba** (el ángulo α entre bobina y bobina es 120°). Verifique que la secuencia de fase de la fuente de alimentación sea **positiva**. Conecte el motor en estrella y energice utilizando una tensión $E_L = 16V$ (conecte la **fase a** a la bobina pequeña). Mida y anote los valores indicados en la tabla **a**.

Calcule los parámetros de la máquina (R_{if} y X_{if}) utilizando los valores medidos de la tabla **a**. Muestre los resultados en la tabla **b**.

Tabla **a** Valores medidos. Medición de I, P y Q por fase.
Posición de las bobinas de la figura **ba**.

Ia	Ib	Ic
A	A	A
Pa	Pb	Pc
W	W	W
Qa	Qb	Qc
var	var	var

Tabla **b** Valores calculados. Cálculo de los parámetros por fase de la máquina (R_{if} y X_{if}).
Posición de las bobinas de la figura **ba**.

	R_{if}	X_{if}	L_{if}
Fase	Ω	Ω	H
a			
b			
c			

a2) Use el **complemento: Reto 2** e introduzca los parámetros por fase de la máquina (R_{if} y X_{if}), use una secuencia de fase **positiva** y muestre en las figuras **c**, **d** y **e** el diagrama fasorial “campo magnético giratorio” para $t = 0s$, $t = 0.001s$ y $t = 0.002s$.

insertar figura

Figura **c** Campo magnético giratorio, secuencia de fase **positiva**, $t = 0s$.

insertar figura

Figura **d** Campo magnético giratorio, secuencia de fase **positiva**, $t = 0.001s$.

insertar figura

Figura **e** Campo magnético giratorio, secuencia de fase **positiva**, $t = 0.002s$.

P1 ¿El sistema es trifásico balanceado?

P2 ¿Aparece el giratorio izquierdo?

P3 ¿El rotor de la máquina se frena? Explique usando las magnitudes de los giratorios izquierdo y derecho.

a3) Verifique que el sentido de rotación de la máquina se invierte intercambiando 2 cables cualesquiera en la máquina. Use el **complemento: Reto 2** y use una secuencia de fase **negativa**. Muestre en las figuras **f**, **g** y **h** el diagrama fasorial “campo magnético giratorio” para $t = 0s$, $t = 0.001s$ y $t = 0.002s$.

insertar figura

Figura **f** Campo magnético giratorio, secuencia de fase **negativa**, $t = 0s$.

insertar figura

Figura **g** Campo magnético giratorio, secuencia de fase **negativa**, $t = 0.001s$.

insertar figura

Figura **h** Campo magnético giratorio, secuencia de fase **negativa**, $t = 0.002s$.

a4) Coloque las bobinas como se muestra en la figura **bb** (el ángulo α entre las bobinas es 0°). Verifique que la secuencia de fase de la fuente de alimentación sea **positiva**. Conecte el motor en estrella y energice utilizando una tensión $E_L = 16V$ (conecte la **fase a** a la bobina pequeña). Mida y anote los valores indicados en la tabla **c**.

Tabla **c** Valores medidos. Medición de I, P y Q por fase.

Posición de las bobinas de la figura **bb**.

Ia	Ib	Ic
A	A	A
Pa	Pb	Pc
W	W	W
Qa	Qb	Qc
var	var	var

Calcule los parámetros de la máquina (R_f y X_f) utilizando los valores medidos de la tabla **c**, muestre los resultados en la tabla **d**.

Tabla **d** Valores calculados. Cálculo de los parámetros por fase de la máquina (R_f y X_f).

Posición de las bobinas de la figura **bb**.

	R_f	X_f	L_f
Fase	Ω	Ω	H
a			
b			
c			

a5) Use el **complemento: Reto 2** e introduzca los parámetros por fase de la máquina (R_f y X_f), use una secuencia de fase **positiva** y muestre en las figuras **i**, **j** y **k** el diagrama fasorial “campos magnéticos pulsantes” para $t = 0s$, $t = 0.001s$ y $t = 0.002s$.

insertar figura

Figura i Campos magnéticos pulsantes, secuencia de fase **positiva**, $t = 0s$.

insertar figura

Figura j Campos magnéticos pulsantes, secuencia de fase **positiva**, $t = 0.001s$.

insertar figura

Figura k Campos magnéticos pulsantes, secuencia de fase **positiva**, $t = 0.002s$.

P4 ¿El rotor de la máquina gira? Explique usando las magnitudes de los giratorios.

Objetivo 2

Conexiones en un estator con seis bobinas

Conexión 1 Motor asíncrono jaula de ardilla trifásico (figura l). Conexión estrella serie, 4 polos.

Las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio de este motor son (dato de placa):

E_L (V)	I_L (A)	$\cos \theta$	P_m (W)	n (rpm)	f (Hz)
42	3.1	0.7	100	1430	50
42	2.8	0.72	110	1715	60

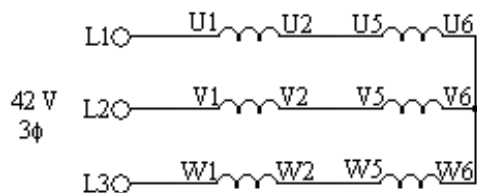


Figura l Conexión estrella serie, 4 polos.

Conexión 2 Motor asíncrono jaula de ardilla trifásico (figura m). Conexión estrella serie, 2 polos.

Las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio de este motor son:

E_L (V)	I_L (A)	$\cos \theta$	P_m (W)	n (rpm)	f (Hz)
42	2.9	0.8	130	2820	50
42	2.9	0.82	130	3320	60

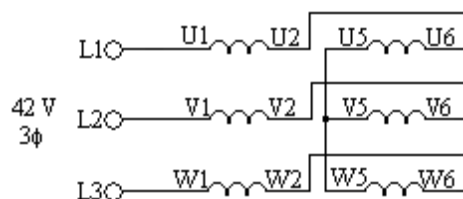


Figura m Conexión estrella serie, 2 polos.

Conexión 3 Motor asíncrono jaula de ardilla trifásico (figura n). Conexión estrella doble paralelo, 4 polos.

Las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio de este motor son:

E_L (V)	I_L (A)	$\cos \theta$	P_m (W)	n (rpm)	f (Hz)
24	6.2	0.73	140	1720	60

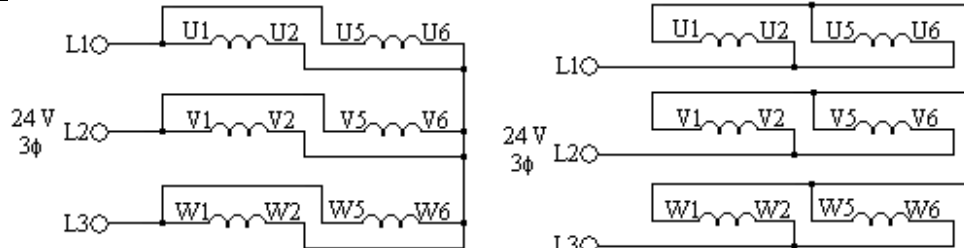


Figura n Conexión estrella doble paralelo, 4 polos.

Conexión 4 Motor asíncrono jaula de ardilla trifásico (figura o). Conexión estrella doble paralelo, 2 polos.

Las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio de este motor son:

E_L (V)	I_L (A)	$\cos \theta$	P_m (W)	n (rpm)	f (Hz)
42	5.5	0.74	200	2935	50
42	5.6	0.8	260	3505	60

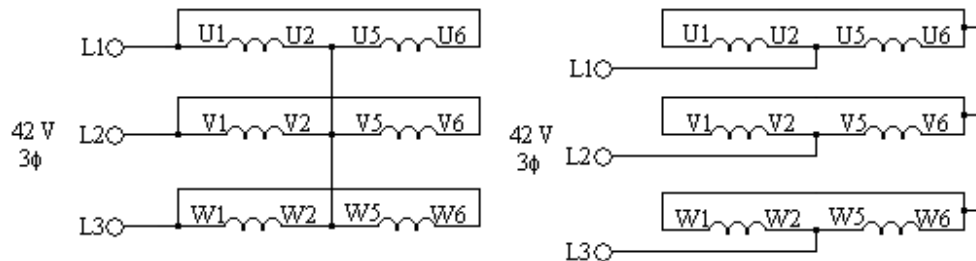


Figura o Conexión estrella doble paralelo, 2 polos.

Conexión 5 Motor asíncrono jaula de ardilla trifásico (figura p). Conexión delta serie, 4 polos.

Las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio de este motor son:

E_L (V)	I_L (A)	$\cos \theta$	P_m (W)	n (rpm)	f (Hz)
24	5.5	0.7	100	1425	50
24	5.5	0.76	120	1695	60

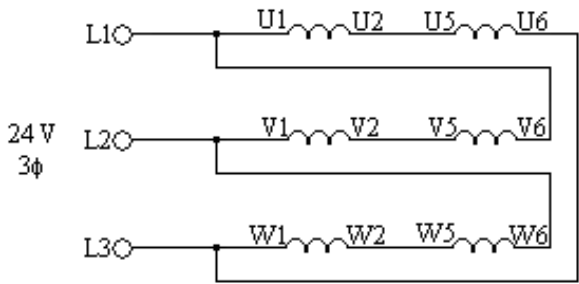


Figura p Conexión delta serie, 4 polos.

Conexión 6 Motor asíncrono jaula de ardilla trifásico (figura q). Conexión delta serie, 2 polos. Las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio de este motor son:

E_L (V)	I_L (A)	$\cos \theta$	P_m (W)	n (rpm)	f (Hz)
24	5	0.9	130	2820	50
24	4.7	0.92	115	3355	60

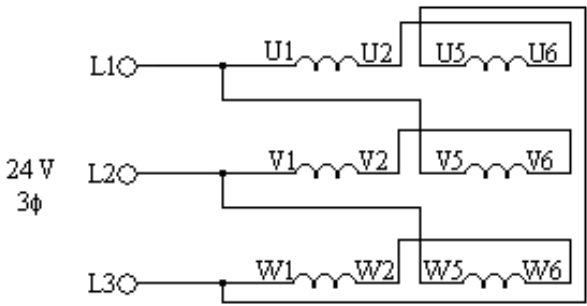


Figura q Conexión delta serie, 2 polos.

Conexión 7 Motor asíncrono jaula de ardilla trifásico (figura r). Conexión delta doble paralelo, 4 polos.

Las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio de este motor son:

E_L (V)	I_L (A)	$\cos \theta$	P_m (W)	n (rpm)	f (Hz)
12	8.4	0.66	80	1745	60

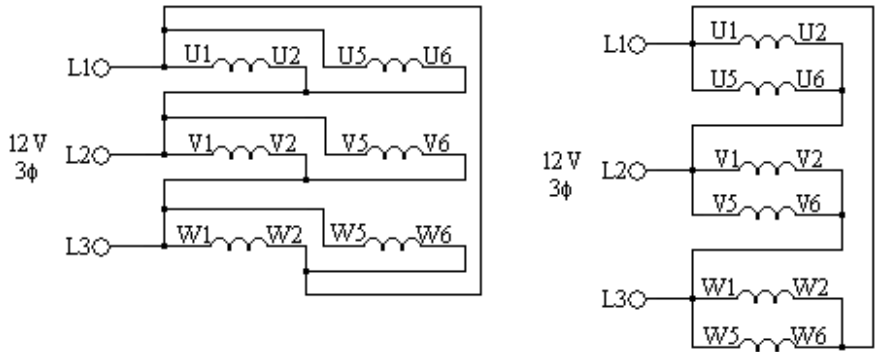


Figura r Conexión delta doble paralelo, 4 polos.

Conexión 8 Motor asíncrono jaula de ardilla trifásico (figura s). Conexión delta doble paralelo, 2 polos.

Las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio de este motor son:

E_L V	I_L A	$\cos \theta$	P_m W	N rpm	f Hz
24	9	0.78	200	2945	50
24	10	0.83	260	3505	60

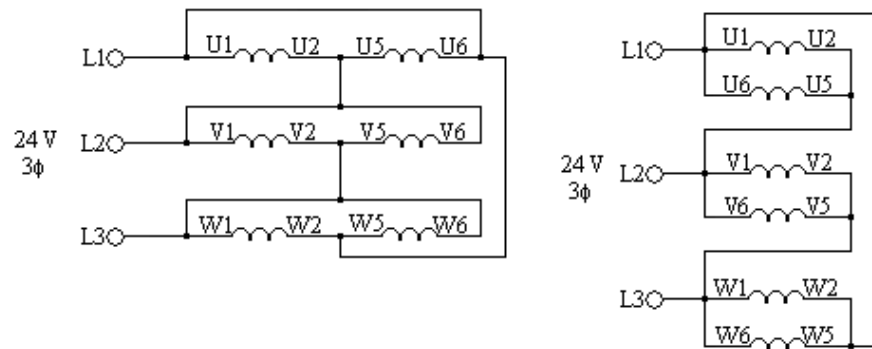


Figura s Conexión delta doble paralelo, 2 polos.

Observación:

2 Para los objetivos 2, 3 y 4 use el regulador de tensión de inducción. En la figura t se muestra esta fuente de alimentación.



Figura t Regulador de tensión de inducción Mod. ULE 821

Llegada: 220V 60Hz,

Salida: 0-400V,

Erogaciones en corriente: 20A por 1 hora, 30A por 3 horas y 17A en servicio continuo.

b) Verifique con las **conexiones 1-2** que se produce un campo magnético giratorio trifásico por medio de corrientes trifásicas. Utilice el estator de la máquina Microlab De Lorenzo y un bote giratorio.

Observación:

3 Al verificar lo anterior debe aplicar un voltaje tal que haga que se verifique la corriente especificada en las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio del motor considerado.

P5 ¿Al utilizar la **conexión 1** el bote giro?

P6 ¿Al utilizar la **conexión 2** el bote giro? Explique.

P7 ¿Porqué el voltaje aplicado es menor al especificado en las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio de la máquina considerada?

P8 ¿Cuál es la magnitud de las tensiones aplicadas?

P9 ¿Porqué las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio de la máquina son diferentes si la frecuencia es diferente?

P10 ¿El número de polos de las conexiones consideradas cambió? Explique (para su respuesta use el **complemento: Problema 1**).

Objetivo 3

c) Use la **conexión 2** e invierta el sentido de rotación de la máquina intercambiando 2 cables cualesquiera en la fuente de alimentación. Verifique que la secuencia de fase cambio y el sentido de rotación de la máquina se invirtió.

Objetivo 4

d) Arme y monte el motor asíncrono jaula de ardilla trifásico Microlab de Lorenzo en su base. Verifique que la secuencia de fase en la fuente de alimentación sea **positiva**. Enegice el motor sin carga mecánica para las **conexiones 1-4**. Mida y registre los valores indicados en la tabla **e**.

Tabla **e** Valores medidos. Análisis de las **conexiones 1-4** del motor del motor de inducción Microlab De Lorenzo.

Conexión	E_L V	I_a A	I_n A	I_o A	n_o rpm	t_a s
1	42		2.8			
2	42		2.9			
3	24		5.6			
4	42		5.5			

I_a corriente de arranque, I_n corriente nominal, I_o corriente de vacío
 n_o velocidad de vacío y t_a tiempo de arranque

La potencia mecánica que desarrolla el motor de inducción Microlab de Lorenzo para cualquiera de las conexiones (**conexiones 1-4**) es pequeña, por lo que es posible parar el rotor con la mano. Antes de usar el guante verifique el sentido de rotación del motor y analice cual mano debe usar. Esta acción permitirá medir I_a .

P11 ¿Porqué la velocidad medida no es estrictamente igual a la velocidad sincrónica definida por la ecuación 2? **P12** ¿Que pasaría si estas velocidades fueran estrictamente iguales? Explique.

P13 ¿Porqué la velocidad sincrónica no coincide con la velocidad de las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio de la máquina considerada?

P14 ¿Porqué las velocidades medidas son el duplo o mitad una con respecto a la otra?

P15 ¿El tiempo de arranque de las máquinas consideradas fué el mismo? Explique.

d1) Lo que se solicita en esta metodología se ejecuta para la **conexión 1**.

Use el dato de placa y calcule S_{3f} , P_{3f} , Q_{3f} , R_{ff} , X_{ff} y η . Registre los valores en la tabla **f**.

Tabla **f** Valores calculados. **Conexión 1**. Valores nominales.

S_{3f} (VA)	P_{3f} (W)	Q_{3f} (var)	R_{ff} (Ω)	X_{ff} (Ω)	η (%)

Mida el factor de potencia para la condición de vacío. Registre el valor en la tabla **g**.

Tabla **g** Valor medido. **Conexión 1**. Vacío.

fp (ind)

Calcule S_{3f} , P_{3f} , Q_{3f} , R_{ff} , X_{ff} y η para la condición de vacío. Registre los valores en la tabla **h**.

Tabla **h** Valores calculados. **Conexión 1**. Vacío.

S_{3f} (VA)	P_{3f} (W)	Q_{3f} (var)	R_{ff} (Ω)	X_{ff} (Ω)	η (%)

Mida el factor de potencia para la condición de rotor bloqueado. Registre el valor en la tabla **i**.

Tabla **i** Valor medido. **Conexión 1**. Rotor bloqueado.

fp (ind)

Calcule S_{3f} , P_{3f} , Q_{3f} , R_{ff} , X_{ff} y η para la condición de rotor bloqueado. Registre los valores en la tabla **j**.

Tabla **j** Valores calculados. **Conexión 1**. Rotor bloqueado.

S_{3f} (VA)	P_{3f} (W)	Q_{3f} (var)	R_{ff} (Ω)	X_{ff} (Ω)	η (%)

Observación:

4 Los parámetros R_{ff} y la X_{ff} corresponden con la impedancia del motor (no rotor) de inducción trifásico jaula de ardilla.

Sugerencias didácticas:

Para la metodología “**a1**”. Aún considerando que los ángulos se verifiquen la velocidad de rotación no es la máxima ya que aparece el otro giratorio (recuerde que el sistema es trifásico desbalanceado). Si la posición de las bobinas “b” y “c” se intercambian se verifica que la rotación del rotor se invierte. En los motores prácticos la forma de invertir el sentido de rotación es a través de la secuencia de fase. Obviamente, en el prototipo “motor de inducción trifásico elemental” cambiar la secuencia de fase invierte el sentido de rotación.

Analizar los **complementos: Reto 1 y 2** es importante porque permite comprender como se produce el campo magnético pulsante en una bobina y el campo magnético giratorio en el motor de inducción trifásico (**subtema 4.1**). Las herramientas computacionales ofrecen resultados al instante (datos, cálculos, gráficas y diagramas vectoriales), lo que permite discutir con el alumno para que se apodere del conocimiento.

Reporte del alumno:

Ver la rúbrica para evaluar prácticas de laboratorio.

Referencia:

Diseño del complemento: Práctica 1

“**Tema 4**” de la asignatura “**Máquinas Eléctricas**”

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Práctica 2

Determinación del dato de placa del motor de inducción trifásico y características electromecánicas

Para esta práctica se emplea el **complemento: Reto 3**.

Objetivos:

- 1 Obtener el dato de placa de un motor de inducción trifásico.
- 2 Análisis de la característica mecánica y características electromecánicas.

Introducción:

Muestre en la figura a el circuito eléctrico (incluyendo instrumentos de medición) a usar para para ejecutar la práctica 2.

Figura a Determinación del dato de placa del motor de inducción jaula de ardilla, Conexión Y.

Material y equipo necesario:

Equipo Leybold Didactic:

- 1 Módulo de medición de velocidad
- 1 Módulo de suministro de potencia
- 1 Unidad de control de la máquina pendular trifásica
- 1 Máquina pendular trifásica
- 1 Motor de inducción trifásico jaula de ardilla
- 1 Wattmetro-varmetro
- 1 Disyuntor de potencia

Otros:

- 1 Voltímetro de corriente alterna
- 1 Amperímetro corriente alterna
- Cables

Metodología:

La figura b muestra el módulo de suministro de potencia, el módulo de medición de velocidad, la unidad de control de la máquina pendular trifásica, máquina pendular trifásica y el motor de inducción trifásico jaula de ardilla del equipo Laybold Didactic.

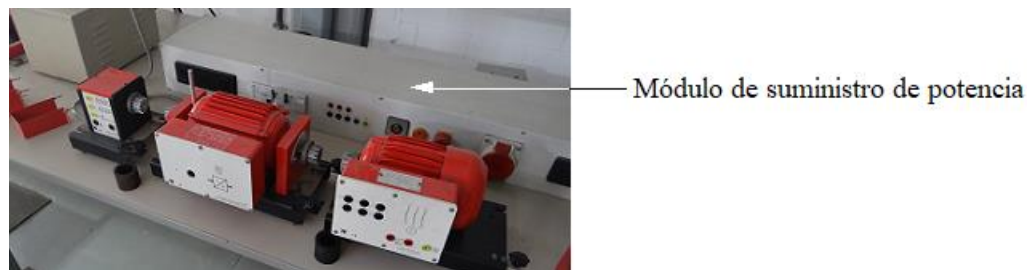
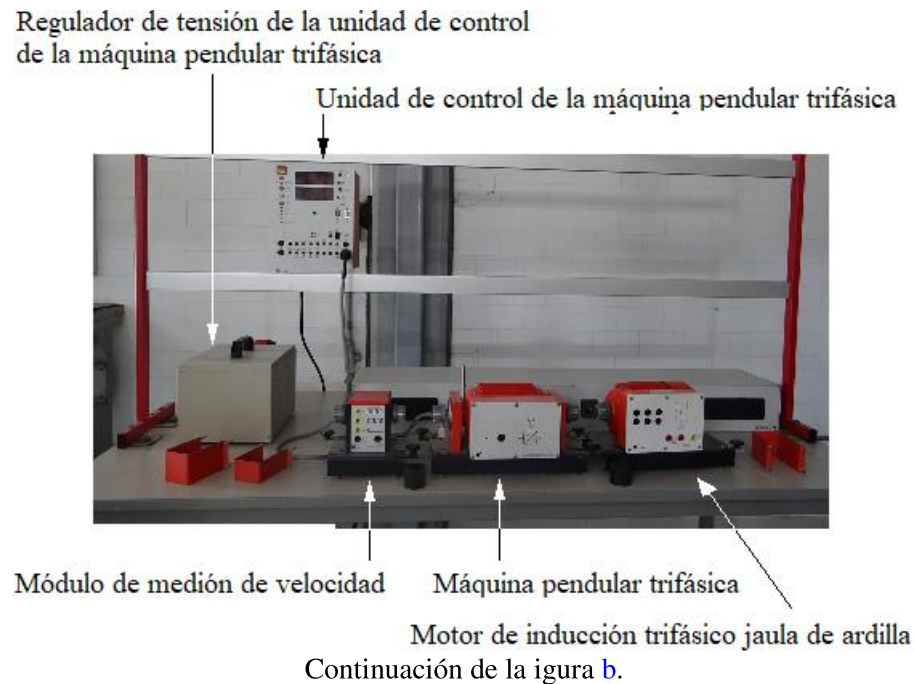


Figura b Módulo de suministro de potencia, módulo de medición de velocidad, unidad de control de la máquina pendular trifásica, máquina pendular trifásica y el motor de inducción trifásico jaula de ardilla del equipo Laybold Didactic.



Objetivo 1

El dato de placa del motor de inducción del sistema electromecánico Leybold Didactic de la figura xiv del **complemento: Reto 3** propuesto por el fabricante se muestra en la tabla a.

Tabla a Dato de placa propuesto por el fabricante. Conexión Y.

E	I	P_m	f_p	f	n
V	A	W		Hz	rpm
200	2	370	0.74	60	1749

a) Verifique que la secuencia de fase de la fuente de alimentación sea **positiva**. Conecte el motor en estrella y utilizando el disyuntor de potencia energice, utilice la tensión de línea de la mesa de trabajo (verifique los alcances de los instrumentos de medición). Mida y usando el **complemento: Reto 3** anote los valores indicados en la tabla b.

El **complemento: Reto 3** calcula los valores indicados en la tabla c. Determine las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio (dato de placa o dato nominal) del motor de inducción trifásico jaula de ardilla Leybold Didactic. Muestre los resultados en la tabla d.

Tabla **b** Valores medidos. Motor de inducción Leybold Didactic. Conexión Y.

f Hz							
60	τ	E_L	I_L	P_{lf}	Q_{lf}	f_p	n
Medición	N·m	V	A	W	var	adimensional	rpm
1	0						
2	0.22						
3	0.4						
4	0.6						
5	0.8						
6	1						
7	1.2						
8	1.42						
9	1.6						
10	1.81						
11	2.04						
12	2.2						
13	2.39						
14	2.64						
15	2.8						
16	3						

Tabla c Valores calculados. Motor de inducción Leybold Didactic. Conexión Y.

[illegible]

Tabla d Dato de placa del motor de inducción trifásico jaula de ardilla Leybold Didactic.
Conexión Y.

E	I	P _m	fp	f	n
V	A	W		Hz	rpm

P1 ¿Por qué el f_p de un motor de inducción mejora por efecto de la carga? Explique usando los triángulos de potencia de las mediciones 1 y 13 (figura c).

insertar figura

Figura c Triángulos de potencia de las mediciones 1 y 13.

Objetivo 2

b) Use el **complemento: Reto 3** para graficar la característica mecánica n vs τ , y las características electromecánicas f_p vs P_m , η vs P_m , I_L vs P_m y n vs P_m . Muestre los comportamientos en las figuras d, e, f, g y h.

insertar figura

Figura d Característica mecánica n vs τ .

insertar figura

Figura e Característica electromecánica f_p vs P_m .

insertar figura

Figura f Característica electromecánica η vs P_m .

insertar figura

Figura g Característica electromecánica I_L vs P_m .

insertar figura

Figura h Característica electromecánica n vs P_m .

Sugerencias didácticas:

Es importante verificar que la secuencia de fase de la fuente de alimentación sea **positiva** para que el vórmetro ofrezca los signos correctos de los valores medidos.

Construir el **complemento: Reto 3** para analizar y comprender el funcionamiento del motor de inducción trifásico es importante porque permite analizar el modelo matemático propuesto por el profesor y aplicarlo satisfactoriamente a la práctica de laboratorio. La herramienta computacional ofrece resultados al instante (datos, cálculos y gráficas), lo que permite discutir al momento con el alumno. La herramienta computacional permite observar la eficiencia del motor de inducción para no aplicar un par que implique que el sistema se frene y posiblemente se destruya. El motor de inducción debe someterse máximo a un 25% de sobrecarga.

El **complemento: Reto 3** es la base para ejecutar el **complemento: Práctica 3**.

Reporte del alumno:

Ver la rúbrica para evaluar prácticas de laboratorio.

Referencia:

**Diseño del complemento:
Práctica 2**

“Tema 4” de la asignatura **“Máquinas Eléctricas”**
M. C. José Alejandro Morones Alba
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Práctica 3

El controlador de potencia reactiva

Para esta práctica se emplea el **complemento: Reto 4 y 5**.

Objetivos:

- 1 Emplear el controlador de potencia reactiva para el análisis del proceso de compensación de potencia reactiva para una carga inductiva mediante el empleo de un banco de capacitores switchable de forma manual, semiautomática y automática.
- 2 Emplear el controlador de potencia reactiva para el análisis del proceso de compensación de potencia reactiva para una carga inductiva mediante el empleo de un banco de capacitores switchable y usar la máquina sincrónica como fuente de reactivos. El proceso de compensación se efectuará de forma automática.

Introducción:

Controlador de potencia reactiva con corrección del factor de potencia

El controlador de potencia reactiva tiene cuatro leds que indican la combinación de bloques de capacitores que está conectando al sistema eléctrico, el banco de capacitores posee una razón de capacitancia de 1:2:4:8, y es posible tener 15 diferentes capacitancias totales (cada capacitancia total está indicada por una combinación de bloques de capacitores diferente), tabla a. Encima de éstos leds está un renglón de leds, los cuales despliegan el $\cos \theta$ (factor de potencia) dentro de un rango entre 0.7 inductivo y 0.98 capacitivo.

Tabla a Combinación de bloques de capacitores.

Bloque de capacitores	Combinación de bloques de capacitores														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	X		X		X		X		X		X		X		X
2		X	X			X	X			X	X			X	X
3				X	X	X	X					X	X	X	X
4								X	X	X	X	X	X	X	X

El controlador de potencia reactiva tiene dos modos de operación (manual y automático) que son preseleccionados con el interruptor de palanca respectivo. En el modo de operación manual, los bloques de capacitores pueden conectarse o desconectarse con el interruptor respectivo. En el modo de operación automático el controlador de potencia reactiva no cambia la combinación de bloques de capacitores en la secuencia desplegada en la tabla 1; en lugar de ello inicia siempre conectando/desconectando los bloques de izquierda a derecha. Por ejemplo, si el controlador de potencia reactiva registra una componente de potencia reactiva inductiva, estando en modo automático, el led “IND” enciende, y conecta el primer bloque de capacitores. Si una carga inductiva se mide después de esto, el segundo bloque de capacitores se agrega, correspondiente a la combinación de bloques de capacitores 3 de la tabla a. La adición del tercer bloque de capacitores corresponde a la combinación de bloques de capacitores 7 de la tabla a. Si el controlador de potencia reactiva mide una sobrecompensación en alguna combinación de bloques de capacitores, se tendrá una potencia reactiva capacitiva, por lo que el led “CAP.” enciende y, otra vez la desconexión de los capacitores de izquierda a derecha comienza.

Valor del operador (c/k) y el valor del factor de potencia (fp). El control de ajuste c/k en el panel frontal del controlador de potencia reactiva sirve para ajustar el valor del operador (C/k). Este

valor “ajuste de sensibilidad” constituye un parámetro decisivo para el controlador de potencia reactiva. Una vez que el valor de este operador se fija, el controlador de potencia reactiva inicia a conectar o desconectar los bloques de capacitores. El operador c/k se calcula usando la ecuación ii.

Banco de capacitores switchable

El banco de capacitores switchable se usa en redes de 3 fases (figura a). Contiene 4 bloques de capacitores, los cuales pueden combinarse de 15 diferentes maneras, proporcionando diferentes capacitancias totales en cada caso. Cada uno de los 4 bloques consiste de 3 capacitores conectados en configuración estrella. Las capacitancias de los cuatro bloques son dimensionadas a razón 1:2:4:8. Por razones de seguridad, los capacitores son conectados con resistencias de descarga, esto asegura que los capacitores se descarguen y se desenergizen. Las 15 diferentes combinaciones de intercambio permiten la selección de potencias reactivas entre 0var y 567.47719var en pasos de 37.831813var. El primer bloque provee un máximo de potencia reactiva de 37.831813var con las 3 capacitancias más pequeñas ($2\mu\text{F}$). El segundo bloque provee un máximo de potencia reactiva 75.663625var, lo cual se logra duplicando la capacitancia y así sucesivamente.

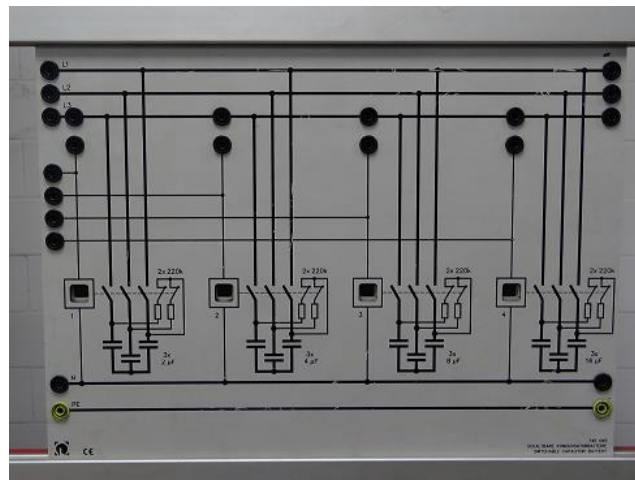


Figura a banco de capacitores switchable.

Muestre en la figura b el circuito eléctrico (completo “incluyendo instrumentos de medición y la conexión del motor síncrono Lab-Volt”).

Insertar figura

Figura b Circuito eléctrico usado para ejecutar la práctica de laboratorio 3.

Material y equipo necesario:

Equipo Leybold Didactic:

- 1 Módulo de medición de velocidad
- 1 Módulo de suministro de potencia
- 1 Controlador de potencia reactiva con corrección del factor de potencia
- 1 Banco de capacitores switchable

- 1 Banco de capacitores
- 1 Unidad de control de la máquina pendular
- 1 Máquina pendular trifásica
- 1 Motor de inducción trifásico jaula de ardilla
- 1 Wattmetro-varmetro monofásico
- 2 Disyuntor de potencia
- 1 Voltímetro de ca
- 1 Amperímetro ca

Equipo Lab-Volt

- 1 Módulo de suministro de potencia EMS8821
- 1 Máquina síncrona EMS8241

Otros:

- 1 Interruptor 1 tiro 3 polos
- 2 Multímetro
- 1 Amperímetro de corriente alterna
- 1 Amperímetro de corriente directa
- Cables

Metodología:

Objetivo 1

a) Use el circuito del **complemento: Práctica 2**. Mediante el disyuntor de potencia **1** energice, utilice la tensión de línea de la mesa de trabajo (verifique los alcances de los instrumentos de medición). Conecte el banco de capacitores **A** al controlador de potencia reactiva con corrección del factor de potencia para corregir el factor de potencia de forma manual, semiautomática y automática.

a1) Considere el siguiente **problema**.

Problema. El motor de inducción Leybold Didactic opera al dato nominal (tabla **d** del **complemento: Práctica 2**). Considere las características del banco de capacitores switchable (banco **A**) descrito en la introducción, la tabla **a** muestra un fragmento de los valores **teóricos** y la tabla **b** muestra un fragmento de los valores **medidos** de las capacitancias y las potencias reactivas que suministran al sistema y considere el factor de potencia especificado en la tabla **d** del **complemento: Práctica 2**. El fp puede mejorarse a **1**. Muestre el diagrama del círculo (las 15 combinaciones) en las figura **c** y **d** usando los valores de la tabla **a** (valores **teóricos**) y **b** (valores **medidos**) considerando el controlador de potencia reactiva descrito en la introducción el cual opera sobre el banco de capacitores switchable (banco **A**), no modifique en ninguno de los 2 casos el ancho de la banda c/k , explique el proceso de compensación usando los **bloques**.

Tabla **a** Valores **teóricos** de capacitancias y potencias reactivas del banco **A**.

bloque	capacitor F	$X_{c/f}$ Ω	Q_{1f} capacitor var	Q_{3f} capacitor var
1	2.00E-06	1326.291192	12.61060424	37.83181272
2	4.00E-06			
3	8.00E-06			
4	1.60E-05			
Suma				

Tabla **b** Valores **medidos** de capacitancias y potencias reactivas del banco **A**.

bloque	capacitor F	$X_{c/f}$ Ω	Q_{1f} capacitor var	Q_{3f} capacitor var
1	7.93E-07	3345.066667	5	15
2				
3				
4				
Suma				

Calcule y muestre los valores faltantes de la tabla **a** y proponga algún procedimiento para obtener los valores de la tabla **b** (muestre los resultados en la tabla).

insertar figura

Figura **c** Diagrama del círculo (las 15 combinaciones) usando el dato nominal y los valores **teóricos** del banco **A**. Conexión Y. $fp =$ de inductivo a 1, $c/k =$ A.

El fasor de corriente compleja (combinación 15) está fuera de la banda c/k , indique el fp al que se encuentra este fasor:

Explicación (figura **c**):

insertar figura

Figura **d** Diagrama del círculo (las 15 combinaciones) usando el dato nominal y los valores **medidos** del banco **A**. Conexión Y. $fp =$ de inductivo a 1, $c/k =$ A.

El fasor de corriente compleja (combinación 15) está fuera de la banda c/k , indique el fp al que se encuentra este fasor:

Explicación (figura **d**):

Observación:

1 El controlador de potencia reactiva con corrección del factor de potencia es especialmente útil cuando la carga cambia en el tiempo.

a2) Considere el problema de la metodología “**a1**)” y un factor de potencia deseado de **0.9 inductivo**, además considere que el banco **B** está conectado al sistema “combinación 15” (recuerde que el controlador de potencia reactiva solo tiene control del banco **A**). La tabla **c**

muestra un fragmento de los valores **teóricos** de las capacitancias y las potencias reactivas que suministra al sistema el banco **B**. Muestre el diagrama del círculo en las figuras **e**, **f** y **g** (las 15 combinaciones) para las **mediciones 2, 6 y 10** (tablas **b** y **c** del **complemento: Práctica 2**) considerando el banco de capacitores **A+B** ambos para valores **teóricos** y explique el proceso de compensación usando las **combinaciones**, no modifique el ancho de la banda c/k.

Calcule los valores faltantes de la tabla **c** (muestre los valores en la tabla).

Tabla **c** Valores **teóricos** de capacitancias y potencias reactivas del banco **B**.

bloque	capacitor F	$X_{c/f}$ Ω	Q_{1f} capacitor var	Q_{3f} capacitor var
1	1.00E-06	2652.582385	6.305302119	18.91590636
2	2.00E-06			
3	4.00E-06			
4	8.00E-06			
Suma				

Observación:

2 El banco de capacitores **B** no es switchable y deberá conectarse directamente a las terminales del motor de inducción a través de un disyuntor de potencia (conecte los capacitores en estrella). El banco contiene 4 bloques de capacitores, los cuales pueden combinarse de 15 diferentes maneras, proporcionando diferentes capacitancias totales en cada caso. Las capacitancias de los cuatro bloques son dimensionadas a razón 1:2:4:8. Las 15 diferentes combinaciones de intercambio permiten la selección de potencias reactivas entre 0var y 283.7385954var en pasos de 18.91590636var.

Calcule los valores faltantes de la tabla **d** (muestre los valores en la tabla).

Observación:

3 Al calcular el operador c/k se considera que la potencia reactiva que inyecta el banco **B** (valores **teóricos**) es parte del sistema por lo que se considera que Q_c es la potencia reactiva del capacitor de menor valor en kvar del banco **A** (valores **teóricos**).

4 El controlador de potencia reactiva tiene control solo sobre el banco **A**; sin embargo, "ve" la potencia reactiva trifásica que suministra en banco **B**.

Tabla d Valores **teóricos** de capacitancias y potencias reactivas del banco **A+B**.

Banco A+B	Q1f capacitor		Q3f capacitor
Combinación	bloque	<u>var</u>	<u>var</u>
1	1	107.190136	321.5704081
2	2		
3	1+2		
4	3		
5	1+3		
6	2+3		
7	1+2+3		
8	4		
9	1+4		
10	2+4		
11	1+2+4		
12	3+4		
13	1+3+4		
14	2+3+4		
15	1+2+3+4	283.7385954	851.2157861

insertar figura

Figura e Diagrama del círculo (las 15 combinaciones) usando los valores **teóricos** del banco **A+B**. **Medición 2** de las tablas b y c del **complemento: Práctica 2**. Conexión Y. $f_p =$ de a 0.9 inductivo, $c/k =$ A. El banco **B** está totalmente conectado al sistema y recuerde que el controlador de potencia reactiva solo tiene control del banco **A**.

Explicación (figura e):

insertar figura

Figura f Diagrama del círculo (las 15 combinaciones) usando los valores **teóricos** del banco **A+B**. **Medición 6** de las tablas b y c del **complemento: Práctica 2**. Conexión Y. $f_p =$ de a 0.9 inductivo, $c/k =$ A. El banco **B** está totalmente conectado al sistema y recuerde que el controlador de potencia reactiva solo tiene control del banco **A**.

Explicación (figura f):

insertar figura

Figura g Diagrama del círculo (las 15 combinaciones) usando los valores **teóricos** del banco **A+B**. **Medición 10** de las tablas b y c del **complemento: Práctica 2**. Conexión Y. $f_p =$ de a 0.9 inductivo, $c/k =$ A. El banco **B** está totalmente conectado al sistema y recuerde que el controlador de potencia reactiva solo tiene control del banco **A**.

Explicación (figura g):

Objetivo 2

b) Los resultados del **problema** de la metodología "**a1**" muestran que el banco de capacitores **A** suministra $Q_{3\text{capacitores}} = "450"$ var al sistema (valor **medido**), lo que implica que para que el fp sea 1 falten $Q_{3\text{línea}} = "195"$ var. Recuerde que la máquina opera al dato nominal y que el factor de potencia deseado de 1. Conecte al circuito eléctrico a través de un interruptor 1 tiro 3 polos el motor síncrono y modifique la corriente de excitación I_e hasta que el fp sea 1 (motor síncrono en vacío).

P1 ¿Al conectar el motor síncrono al circuito eléctrico fue posible que el fp = 1?

Observación:

5 La I_L de diseño del controlador de potencia reactiva es de 3A. Se debe idear un procedimiento para conectar el motor síncrono al sistema ya que la I_L que la fuente suministra y que circula por el controlador de potencia reactiva superaría los 3A (recuerde que el motor síncrono se arranca como motor de inducción y posteriormente entra en sincronismo).

Utilice la metodología "**a**" y "**b**" del **complemento: Práctica 2 Tema 3**. Registre los valores indicados en la tabla **f**, **g**, **h**, **i** y **j**.

Tabla **f** Valores medidos. Motor síncrono en vacío.

$I_e =$		$A, E_L =$		V
I_L	$W_{1\text{lf}}$	$\text{Var}_{1\text{lf}}$	δ_m	Condición
A	W	var	°	de operación

Tabla **g** Valores calculados. Motor síncrono en vacío.

$R_{s35^\circ\text{C}}$	X_s
Ω	Ω

Tabla **h** Valor calculado (predicción). Motor síncrono en vacío.

$E_{oL} = E_L =$	V
δ_e	
°	

Tabla **i** Valores calculados (predicción). Motor síncrono en vacío.

$E_{oL} = E_L =$		V
δ_e	$W_{1\text{lf}}$	$\text{var}_{1\text{lf}}$
°	W	var

Tabla j Valores calculados (valores exactos). Motor síncrono en vacío.

$I_e =$		$A, E_L =$		V	
		E_{of}		V	
E_{of}		$\angle \delta_e$			

I_L		E_3	
A		V	
I_L	$^\circ$	E_3	$^\circ$

W_{1lf}	var_{1lf}	W_{2lf}	var_{2lf}
W	var	W	var

δ_m
$^\circ$

Muestre el diagrama fasorial del motor síncrono para la condición de operación analizada (figura h).

Insertar figura

Figura h Diagrama fasorial del motor síncrono en vacío.

c) Bajo las condiciones de la metodología “b)” (Recuerde que la máquina opera al dato nominal y que el factor de potencia deseado de 1) conecte al circuito el banco B (combinación 11, bloques 1+2+4). Modifique la corriente de excitación I_e del motor síncrono hasta que el fp sea 1 (motor síncrono en vacío).

P2 ¿Cuanta potencia Q_{3f} suministró el condensador síncrono para que el fp sea 1?

P3 ¿Cuanta potencia Q_{3f} (valor **calculado**) suministró el condensador síncrono para que el fp sea 1?

La tabla k muestra un fragmento de los valores medidos de las capacitancias y las potencias reactivas que suministran al sistema.

Tabla **k** Valores **medidos** de capacitancias y potencias reactivas del banco **B**.

bloque	capacitor F	$X_{c/f}$ Ω	Q1f capacitor <u>var</u>	Q3f capacitor <u>var</u>
1	3.17E-07	8362.666667	2	6
2				
3				
4				
Suma				

Proponga algún procedimiento para obtener los valores de la tabla **k** (muestre los resultados en la tabla).

Calcule los valores faltantes de la tabla **l** (muestre los valores en la tabla).

Tabla **l** Valores **medidos** de capacitancias y potencias reactivas del banco **A+B**.

Banco A+B		Q1f capacitor	Q3f capacitor
Combinación	bloque	<u>var</u>	<u>var</u>
1	1	57	171
2	2		
3	1+2		
4	3		
5	1+3		
6	2+3		
7	1+2+3		
8	4		
9	1+4		
10	2+4		
11	1+2+4		
12	3+4		
13	1+3+4		
14	2+3+4		
15	1+2+3+4	202	606

Observación:

6 Al calcular el operador c/k se considera que la potencia reactiva que inyecta el banco **B** (valores **medidos**) es parte del sistema por lo que se considera que Q_c es la potencia reactiva del capacitor de menor valor en kvar del banco **A** (valores **medidos**).

Muestre el diagrama del círculo (las 15 combinaciones) en las figura **i** usando los valores de la tabla **j** (valores **medidos**). No modifique el ancho de la banda c/k , explique el proceso de compensación usando las **combinaciones**.

insertar figura

Figura **i** Diagrama del círculo (las 15 combinaciones) usando el dato nominal y los valores de la tabla **j**. Conexión Y. $f_p =$ de inductivo a 1, $c/k =$ A.
El fasor de corriente compleja (combinación 15) está fuera de la banda c/k , indique el f_p al que se encuentra este fasor: inductivo.

Explicación (figura **i**):

Muestre el diagrama del círculo (las 15 combinaciones) en la figura **j** usando los valores de la tabla **j** (valores **medidos**) adicionando la potencia Q que el condensador síncrono debe suministrar (valor **calculado**) para que el factor de potencia sea **1**. No modifique el ancho de la banda c/k , explique el proceso de compensación usando las **combinaciones**.

insertar figura

Figura **j** Diagrama del círculo (las 15 combinaciones) usando el dato nominal y los valores de la tabla **j** adicionando la potencia Q que el condensador síncrono debe suministrar (valor **calculado**) para que el factor de potencia sea **1**. Conexión Y. $f_p =$ de inductivo a 1, $c/k =$ A.
El fasor de corriente compleja (combinación 15) está empalmado con el fasor de corriente compleja al factor de potencia deseado de **1**.

Explicación (figura **j**):

Sugerencias didácticas:

El controlador de potencia reactiva con corrección del factor de potencia no ejecuta su función si la secuencia de fase es incorrecta.

Pueden usarse las tablas **b** y **c** del **complemento: Práctica 2** para calcular R y X para cada valor de carga considerado usando la ley de Ohm ($P = I^2 R$, $Q = I^2 X$). Conocidas R y X se usa la ecuación **i** del **complemento: Reto 4** para calcular X_1 para el factor de potencia deseado y posteriormente calcular QC_{1f} y QC_{3f} . Recuerde que en el **complemento: Reto 4** se explicaron 3 procedimientos para corregir el factor de potencia.

Para la metodología "**c**". Los bancos de capacitores se usan para aproximarse tanto como sea posible al factor de potencia deseado y la máquina síncrona se usa para el ajuste pequeño y fino para que el factor de potencia sea el deseado.

Analizar el **complemento: Reto 4** para corregir el factor de potencia para cargas pasivas y activas monofásicas es importante porque permite analizar los modelos matemáticos propuestos por el profesor permitiendo discutir con el alumno para que se apodere del conocimiento.

Analizar el **complemento: Reto 5** para comprender la operación y uso del controlador de potencia reactiva con corrección del factor de potencia es importante porque permite analizar los modelos matemáticos propuestos por el profesor y aplicarlos satisfactoriamente a la práctica de laboratorio. La herramienta computacional ofrece resultados al instante (datos, cálculos, gráficas y diagramas del círculo), lo que permite discutir al momento con el alumno para que se apodere del conocimiento. La herramienta computacional predice todos y cada uno de los valores que deben

medirse en las metodologías de la práctica, lo que permite cuidar la integridad de los equipos utilizados para no superar los valores nominales especificados por el fabricante.

Reporte del alumno:

Ver la rúbrica para evaluar prácticas de laboratorio.

Referencia:

**Diseño del complemento:
Práctica 3**

“**Tema 4**” de la asignatura “**Máquinas Eléctricas**”

M. C. José Alejandro Morones Alba
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

TPS 11.4.1
REACTIVA POWER COMPENSATION OF AN INDUCTIVE LOAD
Fundamentals

Documento base para el diseño del complemento: Práctica 3

LEYBOLD DIDACTIC GmBH
Dipl.-Ing. M. Thiel

Anexo

Solución de las prácticas de laboratorio

Práctica 1

Análisis preliminar del motor de inducción trifásico y conexiones trifásicas

Discusión de resultados:

Objetivo 1

a1)

Tabla a Valores medidos. Medición de I, P y Q por fase.

Posición de las bobinas de la figura ba.

Ia	Ib	Ic
A	A	A
2	1.5	1.3
Pa	Pb	Pc
W	W	W
12	7	5
Qa	Qb	Qc
var	var	var
13	12	11

Tabla b Valores calculados. Cálculo de los parámetros por fase de la máquina (R_f y X_f).

Posición de las bobinas de la figura ba.

	R_f	X_f	L_f
Fase	Ω	Ω	H
a	3	3.25	0.008
b	3.111	5.333	0.014
c	2.958	6.508	0.017

a2)

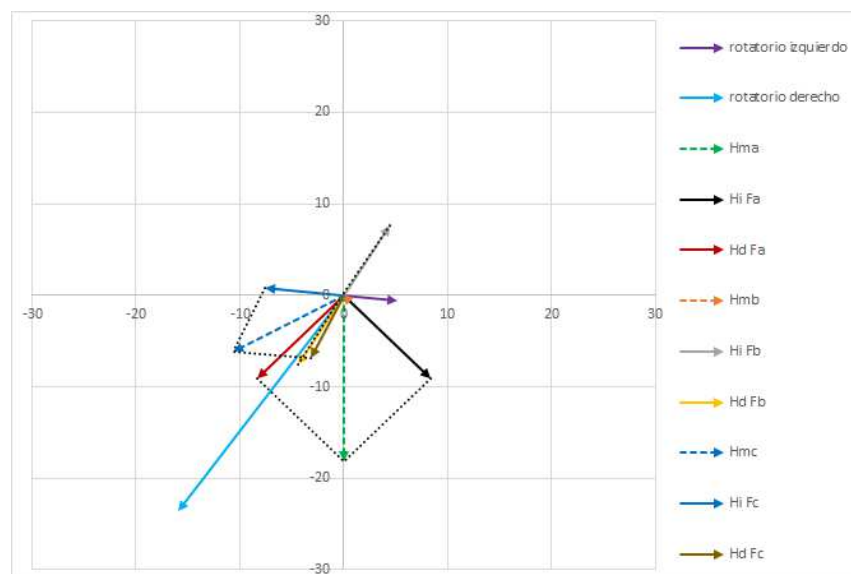


Figura c Campo magnético giratorio, secuencia de fase **positiva**, $t = 0s$.

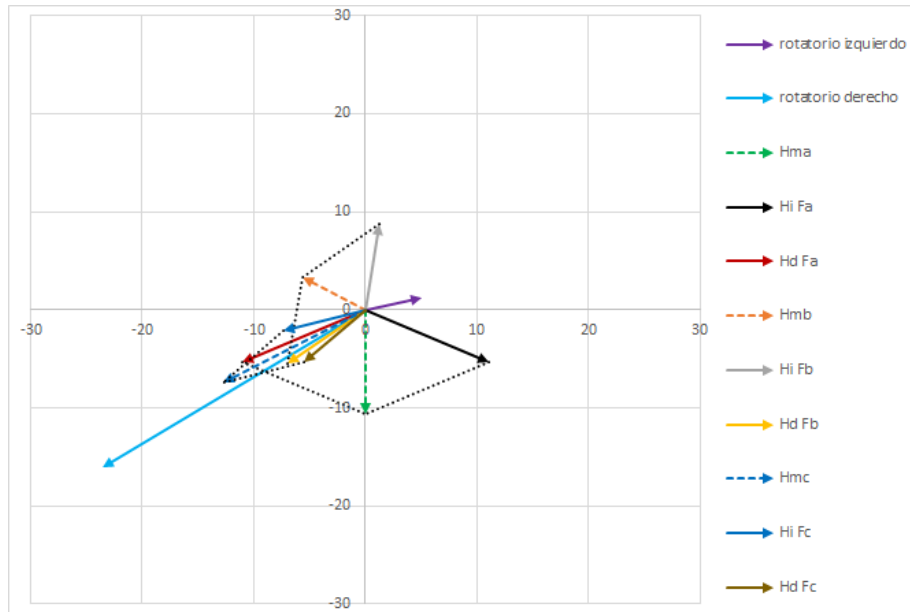


Figura d Campo magnético giratorio, secuencia de fase **positiva**, $t = 0.001s$.

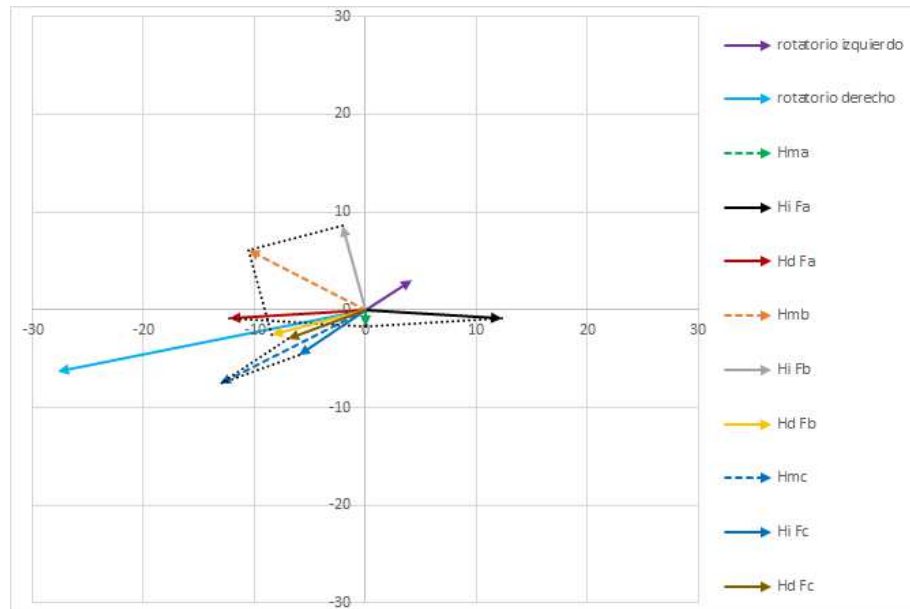


Figura e Campo magnético giratorio, secuencia de fase **positiva**, $t = 0.002s$.

P1 ¿El sistema es trifásico balanceado? Explique. La fuente de alimentación es trifásica balanceada, la carga es trifásica desbalanceada lo que implica que el sistema sea trifásico desbalanceado.

P2 ¿Aparece el giratorio izquierdo? Si.

P3 ¿El rotor de la máquina se frena? La magnitud del giratorio izquierdo es 5.184A/m y la magnitud del giratorio derecho es 28.469A/m, estos giratorios se mueven en direcciones contrarias lo que implica que el rotor de la maquina gire hacia la derecha frenándose.

a3)

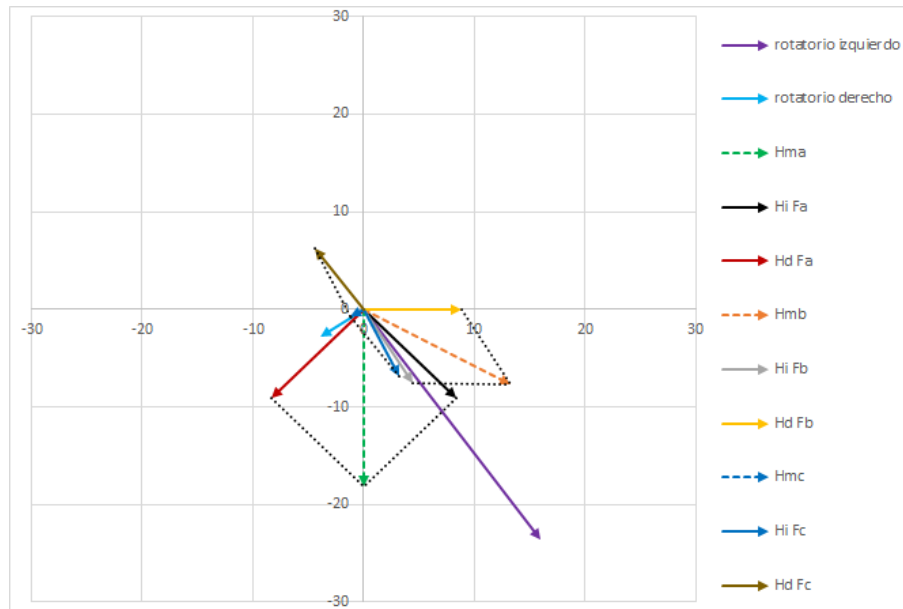


Figura f Campo magnético giratorio, secuencia de fase **negativa**, $t = 0s$.

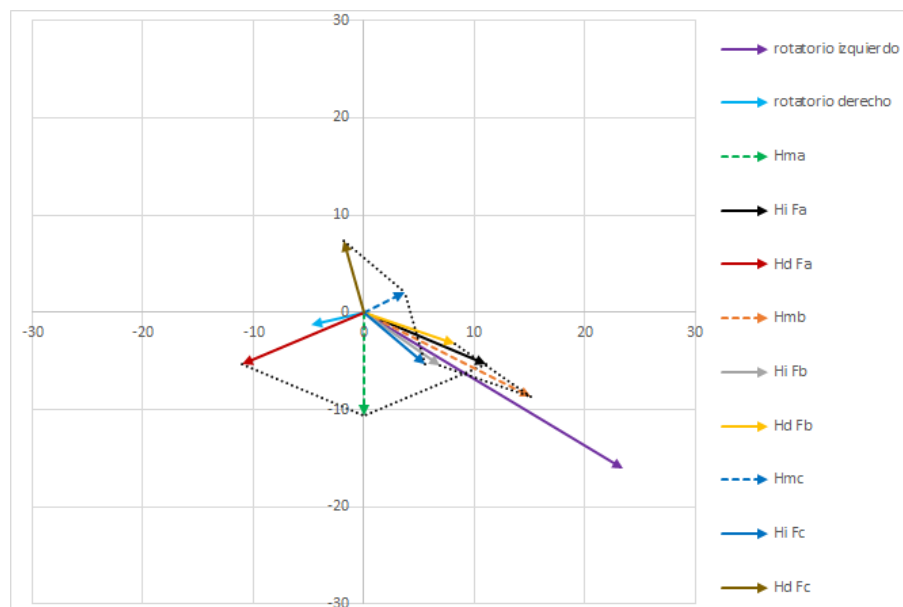


Figura g Campo magnético giratorio, secuencia de fase **negativa**, $t = 0.001s$.

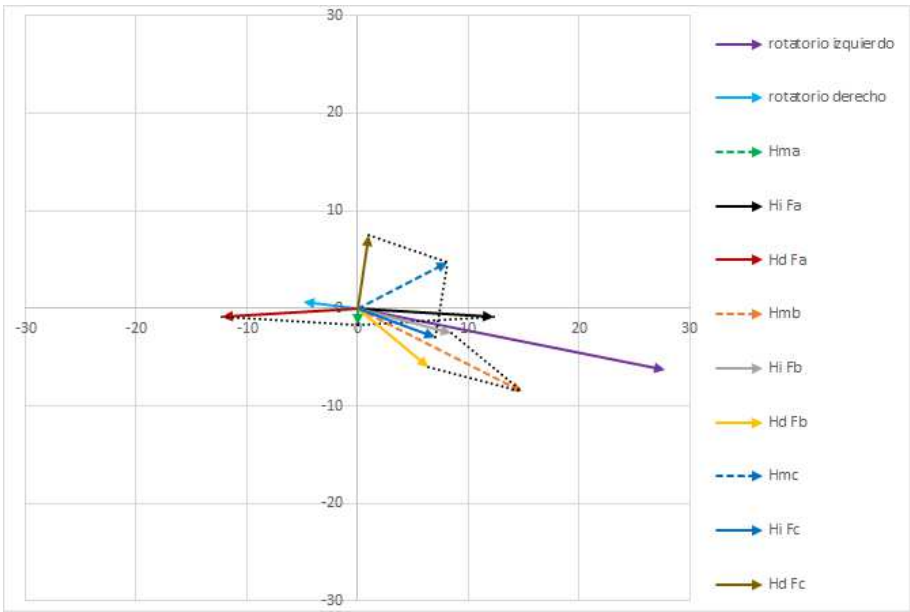


Figura h Campo magnético giratorio, secuencia de fase **negativa**, $t = 0.002s$.

a4)

Tabla c Valores medidos. Medición de I, P y Q por fase.
Posición de las bobinas de la figura bb.

Ia	Ib	Ic
A	A	A
1.9	1.4	1.2
Pa	Pb	Pc
W	W	W
12	7	5
Qa	Qb	Qc
var	var	var
12	11	10

Tabla d Valores calculados. Cálculo de los parámetros por fase de la máquina ($R_{/f}$ y $X_{/f}$).
Posición de las bobinas de la figura bb.

	$R_{/f}$	$X_{/f}$	$L_{/f}$
Fase	Ω	Ω	H
a	3.324	3.324	0.008
b	3.571	5.612	0.014
c	3.472	6.944	0.018

a5)

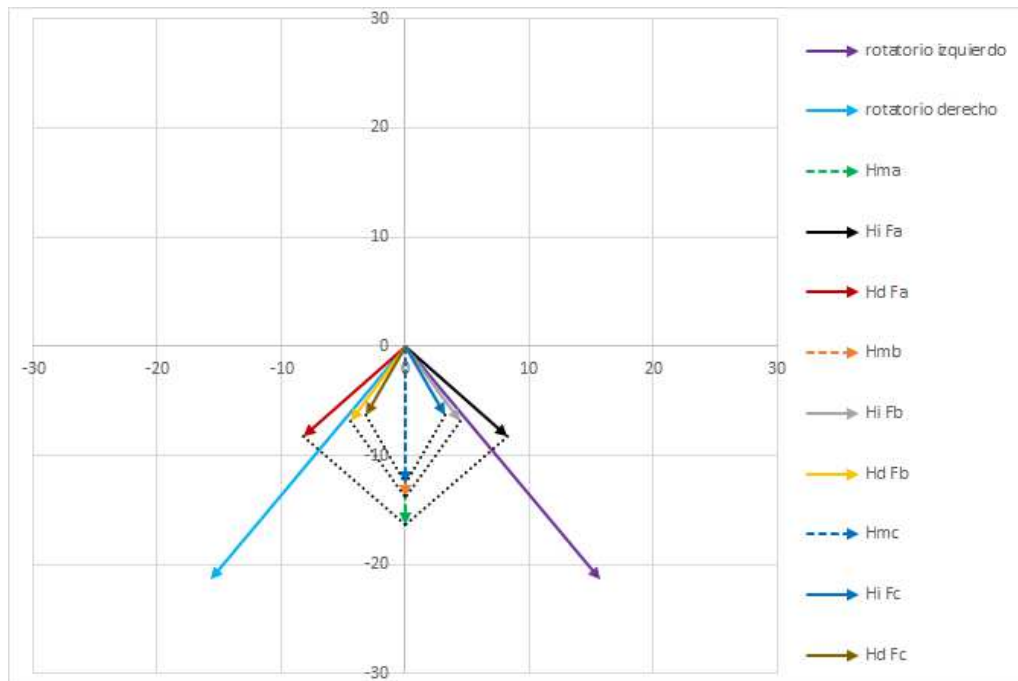


Figura i Campos magnéticos pulsantes, secuencia de fase **positiva**, $t = 0s$.

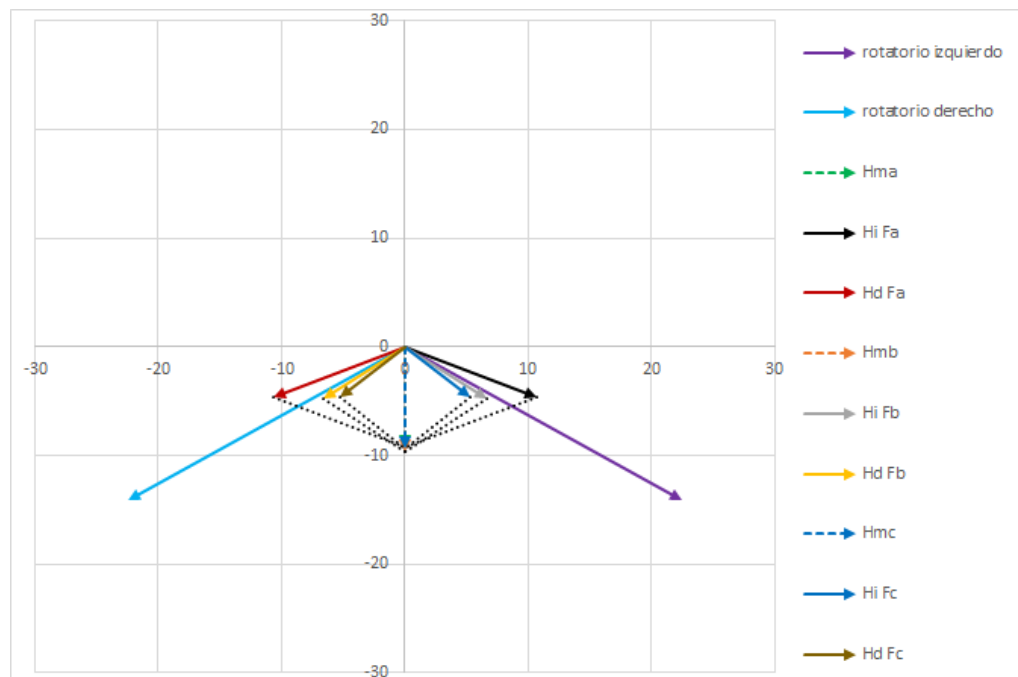


Figura j Campos magnéticos pulsantes, secuencia de fase **positiva**, $t = 0.001s$.

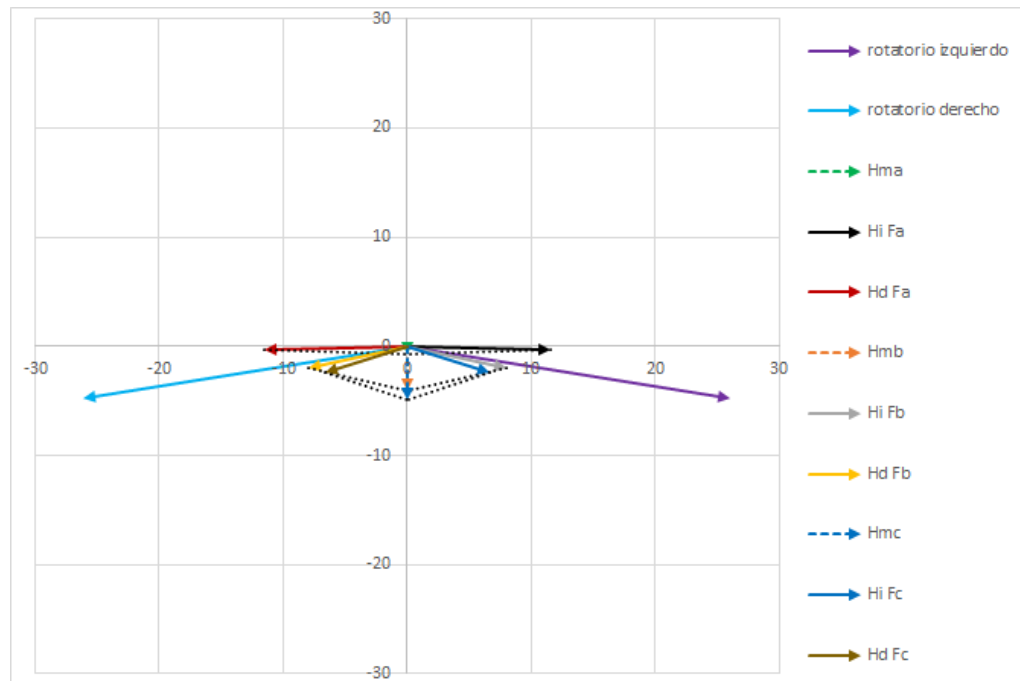


Figura k Campos magnéticos pulsantes, secuencia de fase **positiva**, $t = 0.002s$.

P4 ¿El rotor de la máquina gira? La magnitud de ambos giratorios es de 26.520A/m por lo que el bote no gira.

Objetivo 2

b)

P5 ¿Al utilizar la **conexión 1** el bote giro? No. La inercia del bote es grande, se requiere que la intensidad del campo magnético giratorio sea mas grande.

P6 ¿Al utilizar la **conexión 2** el bote giro? Si, la velocidad del campo magnético giratorio trifásico es 3600rpm contra 1800rpm por lo que la posibilidad de que el bote gire es mas alta. Una respuesta alternativa a la afirmación anterior es que la intensidad del campo magético giratorio es mas alta (debe ejecutarse la metodología “a1”) y “a2”) para ambas conexiones para verificar lo anterior).

P7 ¿Porqué el voltaje aplicado es menor al especificado en las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio de las máquinas consideradas? Porque la impedancia del estator es mas pequeña que la impedancia de la máquina (falta insertar el rotor).

P8 ¿Cuál es la magnitud de las tensiones aplicadas? Considerando la nota:

Conexión 1: $E_L=15V$

Conexión 2: $E_L=18V$

P9 ¿Porqué las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio de la máquina son diferentes si la frecuencia es diferente? **La impedancia cambia con la frecuencia lo que implica que las cantidades eléctricas y mecánicas en operación cambien.**

P10 ¿El número de polos de las conexiones consideradas cambió? **Si, el complemento: Problema 1 permitió analizar y comprender que el número de polos es diferente.**

Objetivo 4

d)

Tabla e Valores medidos. Análisis de las **conexiones 1-4** del motor del motor de inducción Microlab De Lorenzo.

Conexión	E_L V	I_a A	I_n A	I_o A	n_o rpm	t_a s
1	42	10.3	2.8	2.3	1789	1
2	42	11.3	2.9	2.4	3590	2.5
3	24	22.4	5.6	4.9	1792	1
4	42	22	5.5	4.8	3591	2

P11 ¿Porqué la velocidad medida no es estrictamente igual a la velocidad sincrónica definida por la ecuación 2? **Porque el rotor sigue al campo magnético giratorio, la velocidad nunca alcanza la velocidad del campo manético giratorio. P12** ¿Que pasaría si estas velocidades fueran estrictamente iguales? **El rotor pararia porque el movimiento relativo sería nulo.**

P13 ¿Porqué la velocidad sincrónica no coincide con la velocidad de las cantidades eléctricas y mecánicas en operación promedio de la máquina considerada? **Porque la máquina entrega potencia mecánica al valor especificado. La velocidad disminuye por efecto de la carga.**

P14 ¿Porqué las velocidades medidas son el duplo o mitad una con respecto a la otra? **Porque el número de polos es el duplo o la mitad una con respecto a la otra.**

P15 ¿El tiempo de arranque de las máquinas consideradas fué el mismo? **No. Este sistema electromecánico tiene bastante inercia, la inercia depende del buen armado de la máquina.**

d1)

Tabla f Valores calculados. **Conexión 1.** Valores nominales.

S_{3f} (VA)	P_{3f} (W)	Q_{3f} (var)	R_{ff} (Ω)	X_{ff} (Ω)	η (%)
203.689	146.656	141.355	18.706	18.029	75.005

Tabla g Valor medido. **Conexión 1.** Vacío.

f_p (ind)
0.4

Tabla **h** Valores calculados. **Conexión 1**. Vacío.

S_{3f} (VA)	P_{3f} (W)	Q_{3f} (var)	R_{ff} (Ω)	X_{ff} (Ω)	η (%)
167.316	66.926	153.347	12.651	28.988	14.941

Tabla **i** Valor medido. **Conexión 1**. Rotor bloqueado.

f_p (ind)
0.2

Tabla **j** Valores calculados. **Conexión 1**. Rotor bloqueado.

S_{3f} (VA)	P_{3f} (W)	Q_{3f} (var)	R_{ff} (Ω)	X_{ff} (Ω)	η (%)
749.285	149.857	734.146	1.412	6.920	0

Práctica 2

Determinación del dato de placa del motor de inducción trifásico y características electromecánicas

Discusión de resultados:

Objetivo 1

a)

Tabla b Valores medidos. Motor de inducción Leybold Didactic. Conexión Y.

f Hz							
60	τ	E_L	I_L	P_{1f}	Q_{1f}	f_p	n
Medición	N·m	V	A	W	var	adimensional	rpm
1	0	224	1.89	20	240	0.2	1800
2	0.22	224	1.85	30	230	0.25	1798
3	0.4	224	1.826	40	230	0.25	1790
4	0.6	224	1.806	50	228	0.25	1786
5	0.8	224	1.792	60	225	0.3	1780
6	1	224	1.783	70	220	0.3	1775
7	1.2	224	1.78	85	220	0.34	1768
8	1.42	224	1.806	100	220	0.35	1763
9	1.6	224	1.825	110	220	0.4	1759
10	1.81	224	1.853	125	220	0.45	1751
11	2.04	224	1.83	140	220	0.55	1745
12	2.2	224	1.88	150	220	0.56	1740
13	2.39	224	1.95	160	215	0.6	1734
14	2.64	224	2.05	180	220	0.61	1723
15	2.8	224	2.1	193	220	0.63	1720
16	3	224	2.19	205	220	0.7	1713

Tabla c Valores calculados. Motor de inducción Leybold Didactic. Conexión Y.

P_{3f}	Q_{3f}	P_m	η	f_p	s	s	S_{1f}	S_{3f}
W	var	W	%	adimensional	%	rpm	VA	VA
60	720	0	0	0.081824018	0	0	240.8318916	722.4956747
90	690	41.415132	46.01681333	0.125389779	0.111111111	2	231.9482701	695.8448103
120	690	74.9652	62.471	0.169383783	0.555555556	10	233.4523506	700.3570518
150	684	112.19652	74.79768	0.214074465	0.777777778	14	233.4180798	700.2542395
180	675	149.0928	82.82933333	0.258896306	1.111111111	20	232.8626204	698.5878613
210	660	185.8425	88.49642857	0.303570318	1.388888889	25	230.8679276	692.6037828
255	660	222.13152	87.1104	0.369242372	1.777777778	32	235.8495283	707.5485849
300	660	262.112262	87.370754	0.42814893	2.055555556	37	241.6609195	724.9827584
330	660	294.66768	89.29323636	0.466060638	2.277777778	41	245.9674775	737.9024326
375	660	331.826757	88.4871352	0.521611554	2.722222222	49	253.0316186	759.0948557
420	660	372.7813843	88.75747245	0.591547407	3.055555556	55	260.7680962	782.3042886
450	660	400.7916	89.0648	0.616944389	3.333333333	60	266.2705391	798.8116173
480	645	433.904022	90.39667125	0.634450845	3.666666667	66	268.0018657	804.005597
540	660	476.250984	88.19462667	0.678939776	4.277777778	77	284.2534081	852.7602242
579	660	504.2352	87.08725389	0.710641594	4.444444444	80	292.6585041	877.9755122
615	660	538.0533	87.48834146	0.723806294	4.833333333	87	300.7074991	902.1224972

Tabla d Dato de placa del motor de inducción trifásico jaula de ardilla Leybold Didactic.
Conexión Y.

E	I	P_m	f_p	f	n
V	A	W		Hz	rpm
224	1.95	433.904022	0.597010769	60	1734

P1 ¿Por qué el f_p de un motor de inducción mejora por efecto de la carga? La figura c muestra que por efecto de la carga la potencia activa aumenta mientras que la potencia reactiva es “casi constante”, esto hace que el facto de potencia mejore.

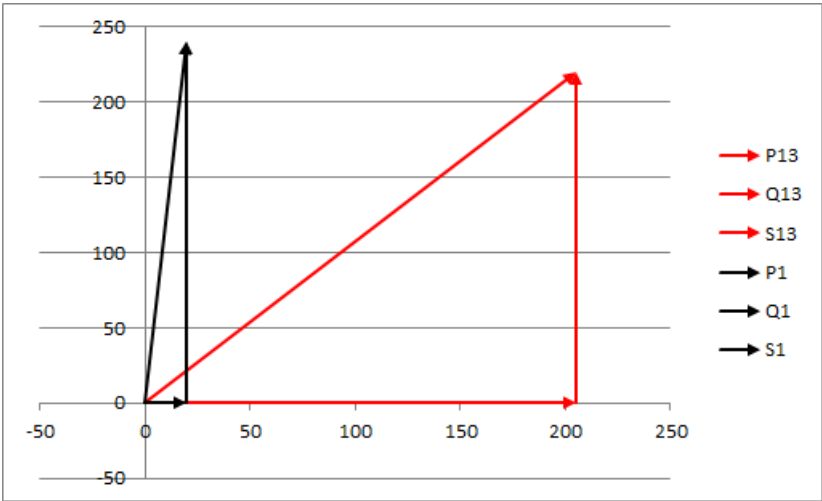


Figura c Triángulos de potencia de las mediciones 1 y 13.

Objetivo 2

b)

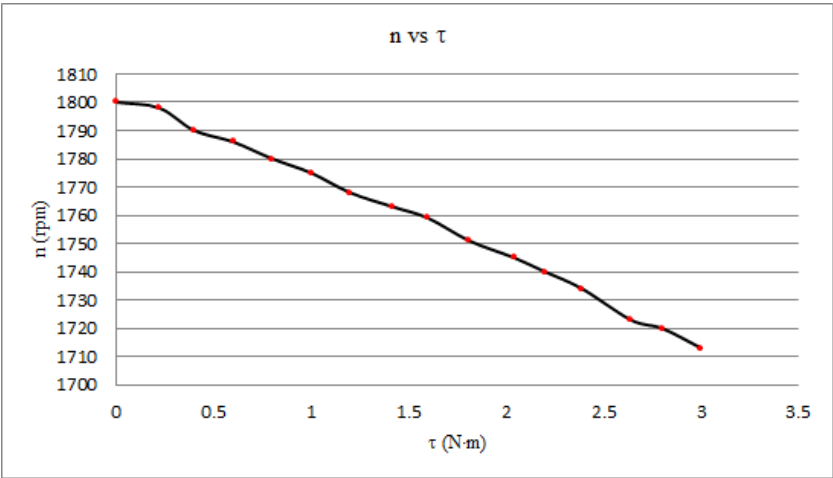


Figura d Característica mecánica n vs τ .

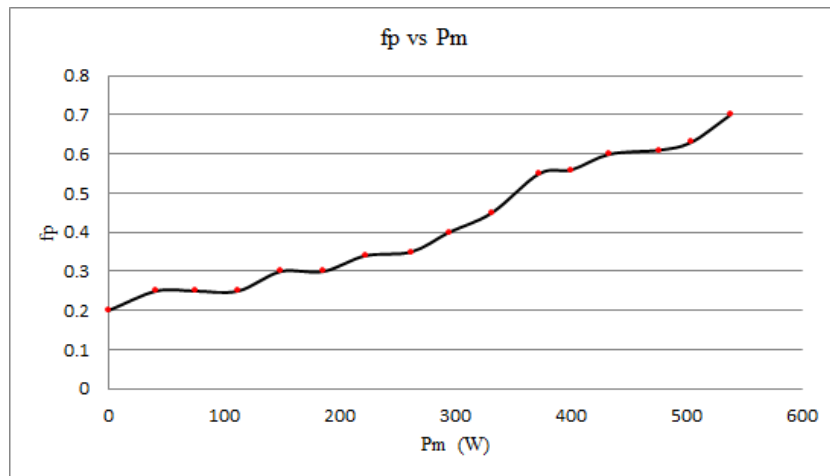


Figura e Característica electromecánica f_p vs P_m .

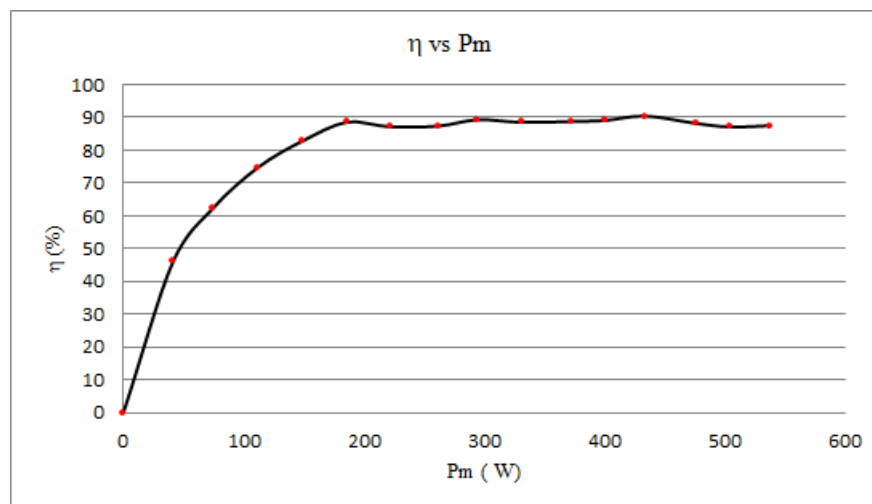


Figura f Característica electromecánica η vs P_m .

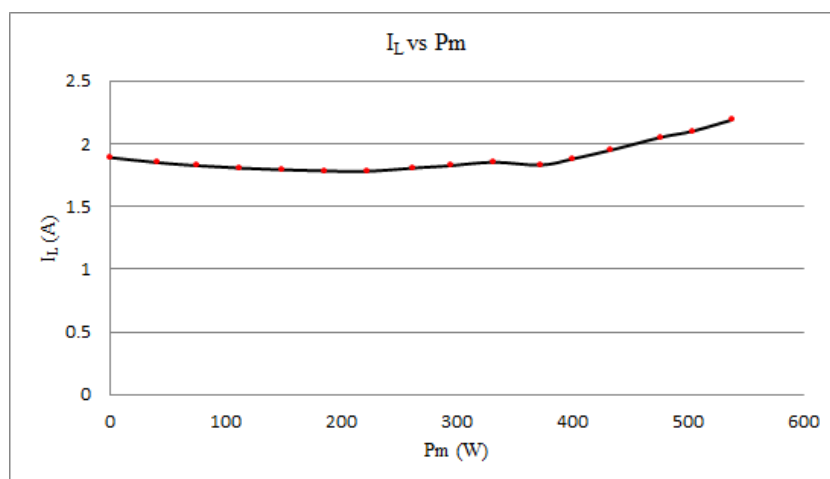


Figura g Característica electromecánica I_L vs P_m .

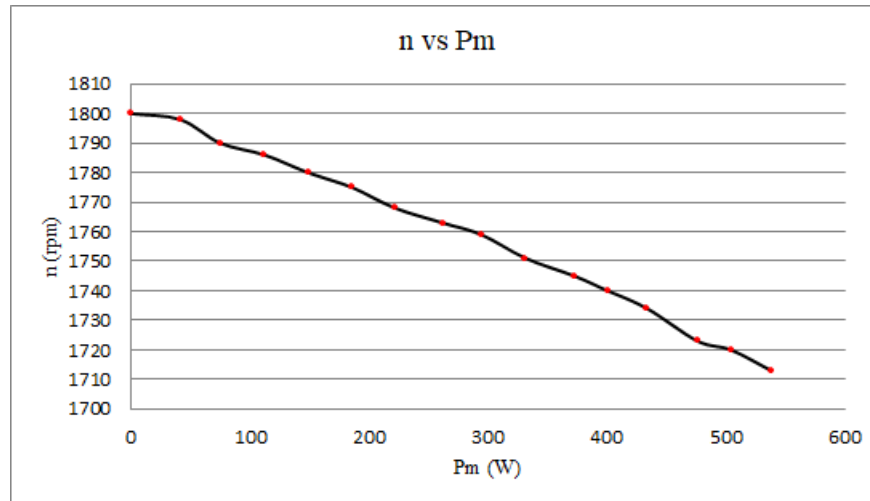


Figura h Característica electromecánica n vs P_m .

Práctica 3

El controlador de potencia reactiva

Discusión de resultados:

Objetivo 1

a1)

Tabla a Valores **teóricos** de capacitancias y potencias reactivas del banco A.

bloque	capacitor F	$X_{c/f}$ Ω	Q_{1f} capacitor var	Q_{3f} capacitor var
1	2.00E-06	1.33E+03	12.61060424	37.83181272
2	4.00E-06	663.1455962	25.22120848	75.66362543
3	8.00E-06	331.5727981	50.44241696	151.3272509
4	1.60E-05	165.7863991	100.8848339	302.6545017
Suma				567.4771908

Tabla b Valores **medidos** de capacitancias y potencias reactivas del banco A.

bloque	capacitor F	$X_{c/f}$ Ω	Q_{1f} capacitor var	Q_{3f} capacitor var
1	7.93E-07	3345.066667	5	15
2	2.37895E-06	1115.022222	15	45
3	6.34E-06	418.1333333	40	120
4	1.43E-05	185.837037	90	270
Suma				450

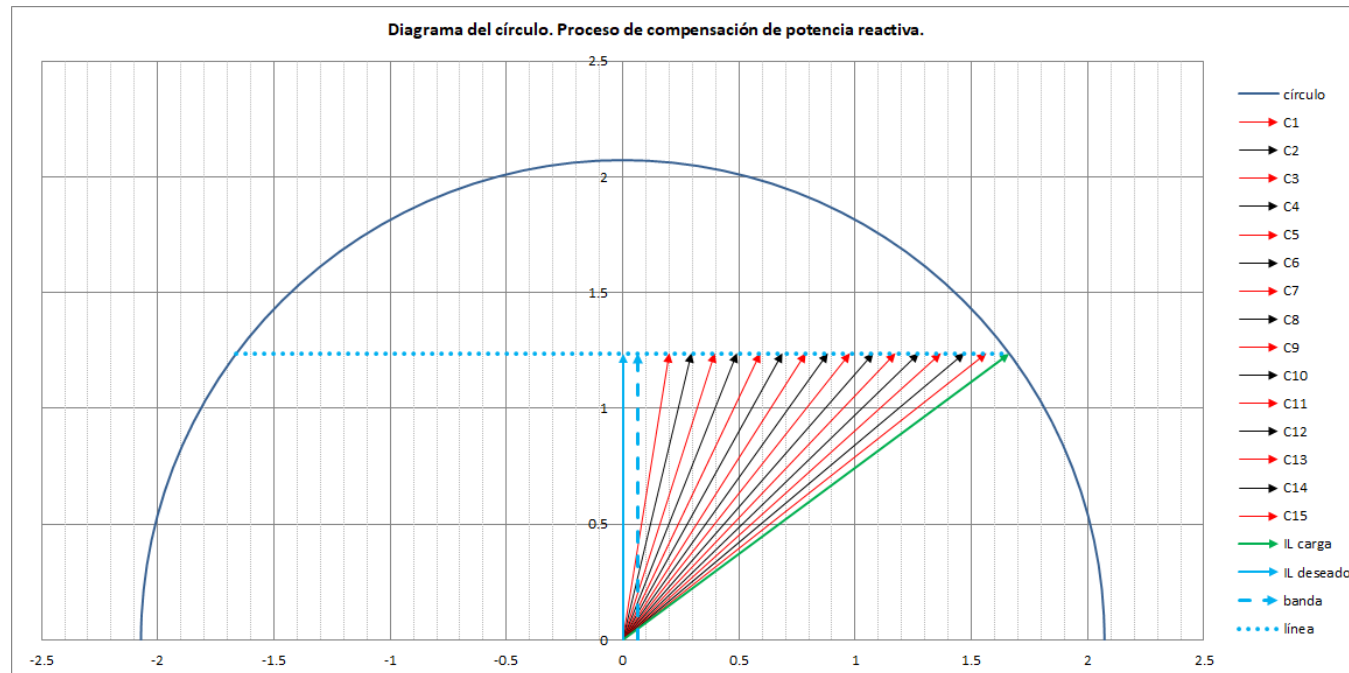


Figura c Diagrama del círculo (las 15 combinaciones) usando el dato nominal y los valores **teóricos** del banco **A**. Conexión Y.
 f_p = de 0.597010769 inductivo a 1, $c/k = 0.064356504A$.

El fasor de corriente compleja (combinación 15) está fuera de la banda c/k , indique el f_p al que se encuentra este fasor: 0.987207651 inductivo.

Explicación (figura c): Las 15 diferentes combinaciones de intercambio permiten la selección de potencias reactivas entre 0var y 567.47719var en pasos de 37.831813var. El f_p mejora a medida que los bloques de capacitores se conectan al sistema. El fasor de corriente compleja al factor de potencia actual está fuera de la banda c/k . La conexión del **primer bloque** de capacitores mejora el factor de potencia a 0.620166836 inductivo, la suma del **segundo bloque** de capacitores mejora el factor de potencia a 0.670233476 inductivo, la suma del **tercer bloque** de capacitores mejora el factor de potencia a 0.783904881 inductivo. El fasor de corriente compleja está fuera de la banda c/k , de modo que el controlador de potencia reactiva conecta el **cuarto bloque** de capacitores mejorando el factor de potencia a 0.987207651 inductivo, el controlador de potencia reactiva registra una componente de potencia reactiva inductiva y el led “IND” enciende.

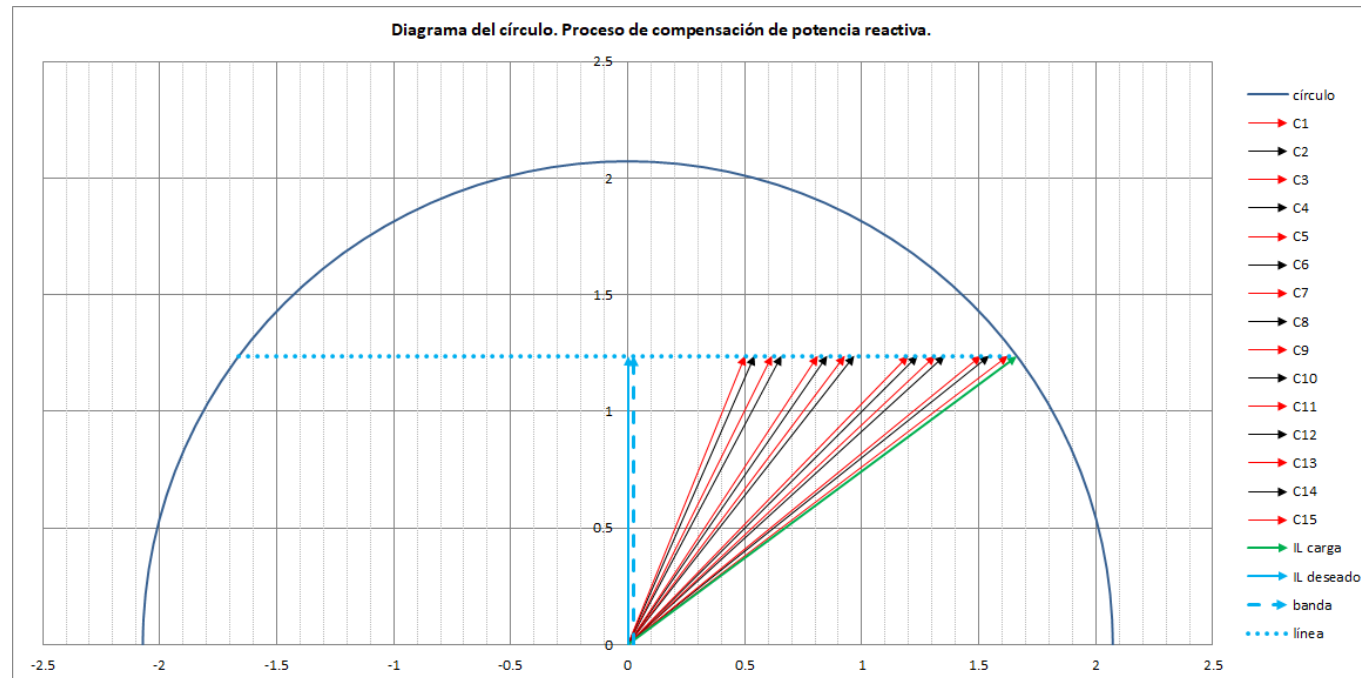


Figura d Diagrama del círculo (las 15 combinaciones) usando el dato nominal y los valores **medidos** del banco A. Conexión Y.
fp = de 0.597010769 inductivo a 1, c/k = 0.02551682A.

El fasor de corriente compleja (combinación 15) está fuera de la banda c/k, indique el fp al que se encuentra este fasor: 0.926466577 inductivo.

Explicación (figura d): Las 15 diferentes combinaciones de intercambio permiten la selección de potencias reactivas entre 0var y 450 var. El fp mejora a medida que los bloques de capacitores se conectan al sistema. El fasor de corriente compleja al factor de potencia actual está fuera de la banda c/k. La conexión del **primer bloque** de capacitores mejora el factor de potencia a 0.606043215 inductivo, la suma del **segundo bloque** de capacitores mejora el factor de potencia a 0.634316612 inductivo, la suma del **tercer bloque** de capacitores mejora el factor de potencia a 0.718240223 inductivo. El fasor de corriente compleja está fuera de la banda c/k, de modo que el controlador de potencia reactiva conecta el **cuarto bloque** de capacitores mejorando el factor de potencia a 0.926466577 inductivo, el controlador de potencia reactiva registra una componente de potencia reactiva inductiva y el led “IND” enciende.

a2)

Tabla c Valores **teóricos** de capacitancias y potencias reactivas del banco **B**.

bloque	capacitor F	$X_{c/f}$ Ω	Q_{1f} capacitor var	Q_{3f} capacitor var
1	1.00E-06	2652.582385	6.305302119	18.91590636
2	2.00E-06	1326.291192	12.61060424	37.83181272
3	4.00E-06	663.1455962	25.22120848	75.66362543
4	8.00E-06	331.5727981	50.44241696	151.3272509
Suma				283.7385954

Tabla d Valores **reales** de capacitancias y potencias reactivas del banco **A+B**.

Banco A+B		Q_{1f} capacitor	Q_{3f} capacitor
Combinación	bloque	var	var
1	1	107.190136	321.5704081
2	2	119.8007403	359.4022208
3	1+2	132.4113445	397.2340335
4	3	145.0219487	435.0658462
5	1+3	157.632553	472.897659
6	2+3	170.2431572	510.7294717
7	1+2+3	182.8537615	548.5612844
8	4	195.4643657	586.3930971
9	1+4	208.0749699	624.2249098
10	2+4	220.6855742	662.0567225
11	1+2+4	233.2961784	699.8885353
12	3+4	245.9067827	737.720348
13	1+3+4	258.5173869	775.5521607
14	2+3+4	271.1279911	813.3839734
15	1+2+3+4	283.7385954	851.2157861

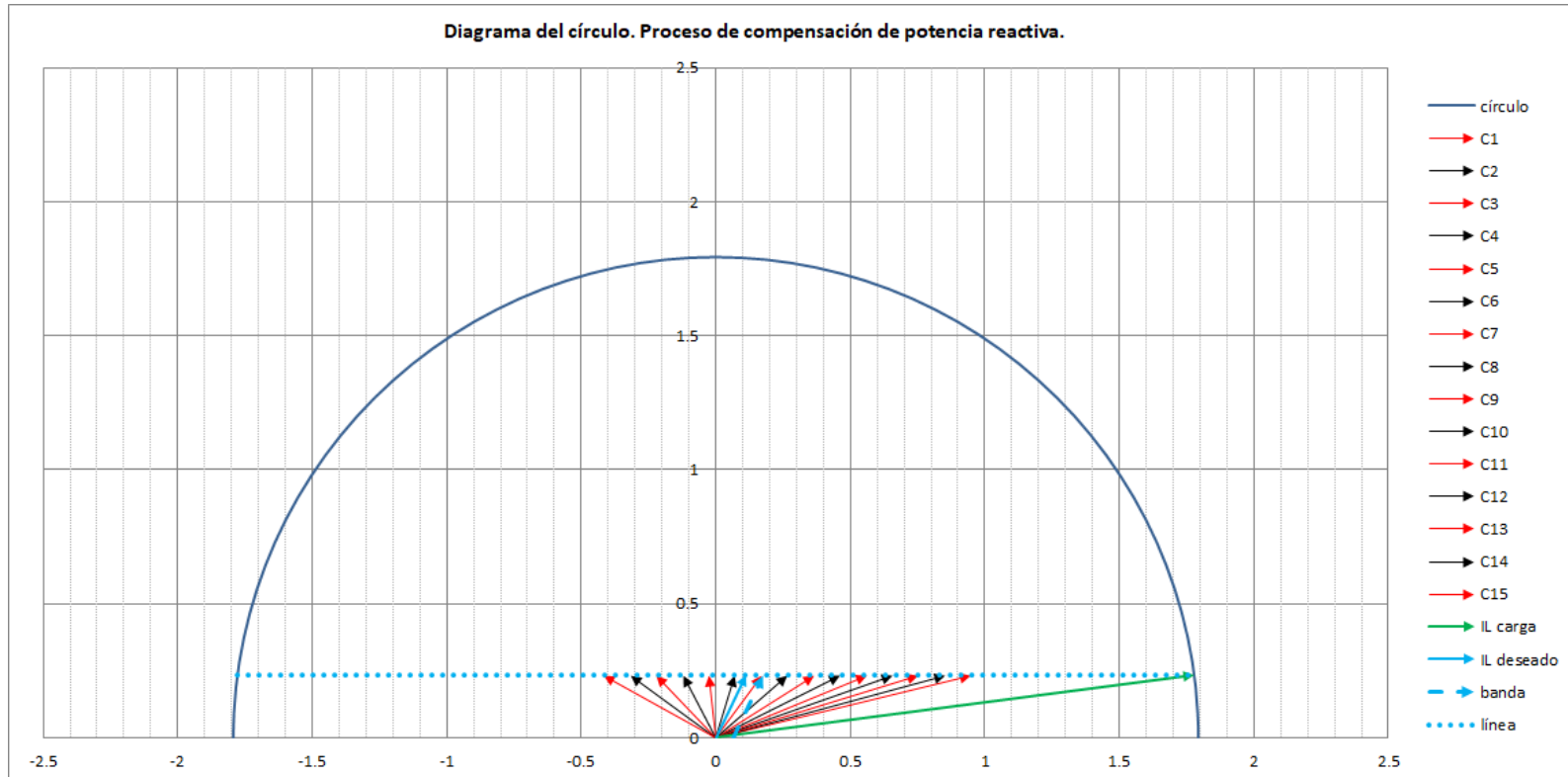


Figura e Diagrama del círculo (las 15 combinaciones) usando los valores **teóricos** del banco **A+B**. **Medición 2** de las tablas **b y c** del **complemento: Práctica 2**. Conexión Y.

f_p = de 0.129339184 inductivo a 0.9 inductivo, $c/k = 0.064356504A$.

El banco **B** está totalmente conectado al sistema y recuerde que el controlador de potencia reactiva solo tiene control del banco **A**.

Explicación (figura e): El proceso termina con la combinación 9, el fasor de corriente compleja está dentro de la banda c/k , el f_p al que se encuentra este fasor: 0.807366082 inductivo.

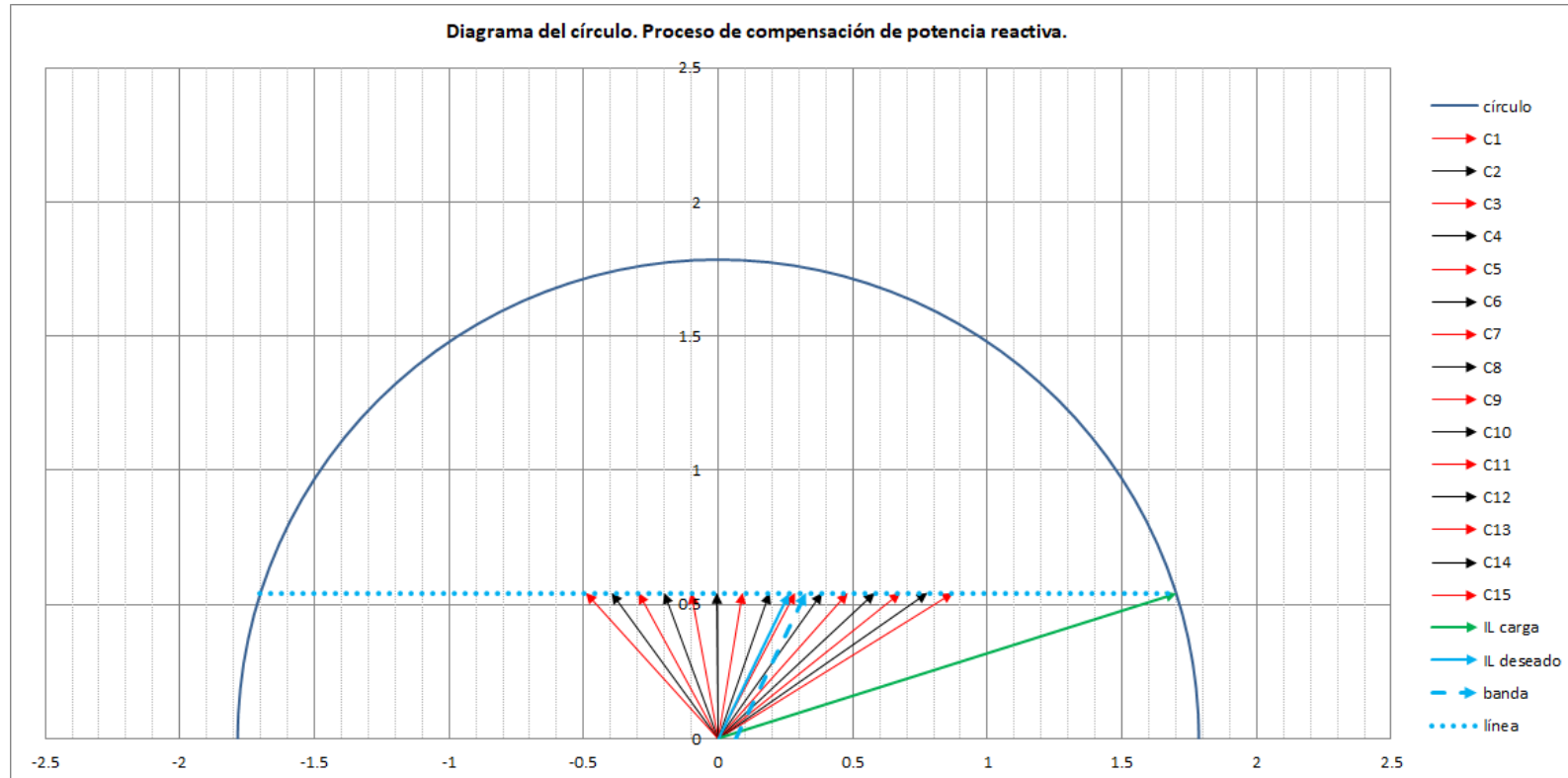


Figura f Diagrama del círculo (las 15 combinaciones) usando los valores **teóricos** del banco **A+B**. **Medición 6** de las tablas **b** y **c** del **complemento:**
Práctica 2.

Conexión Y. f_p = de 0.303203657 inductivo a 0.9 inductivo, $c/k = 0.064356504A$.

El banco **B** está totalmente conectado al sistema y recuerde que el controlador de potencia reactiva solo tiene control del banco **A**.

Explicación (figura f): El proceso termina con la combinación 7, el fasor de corriente compleja está dentro de la banda c/k , el f_p al que se encuentra este fasor: 0.883331353 inductivo.

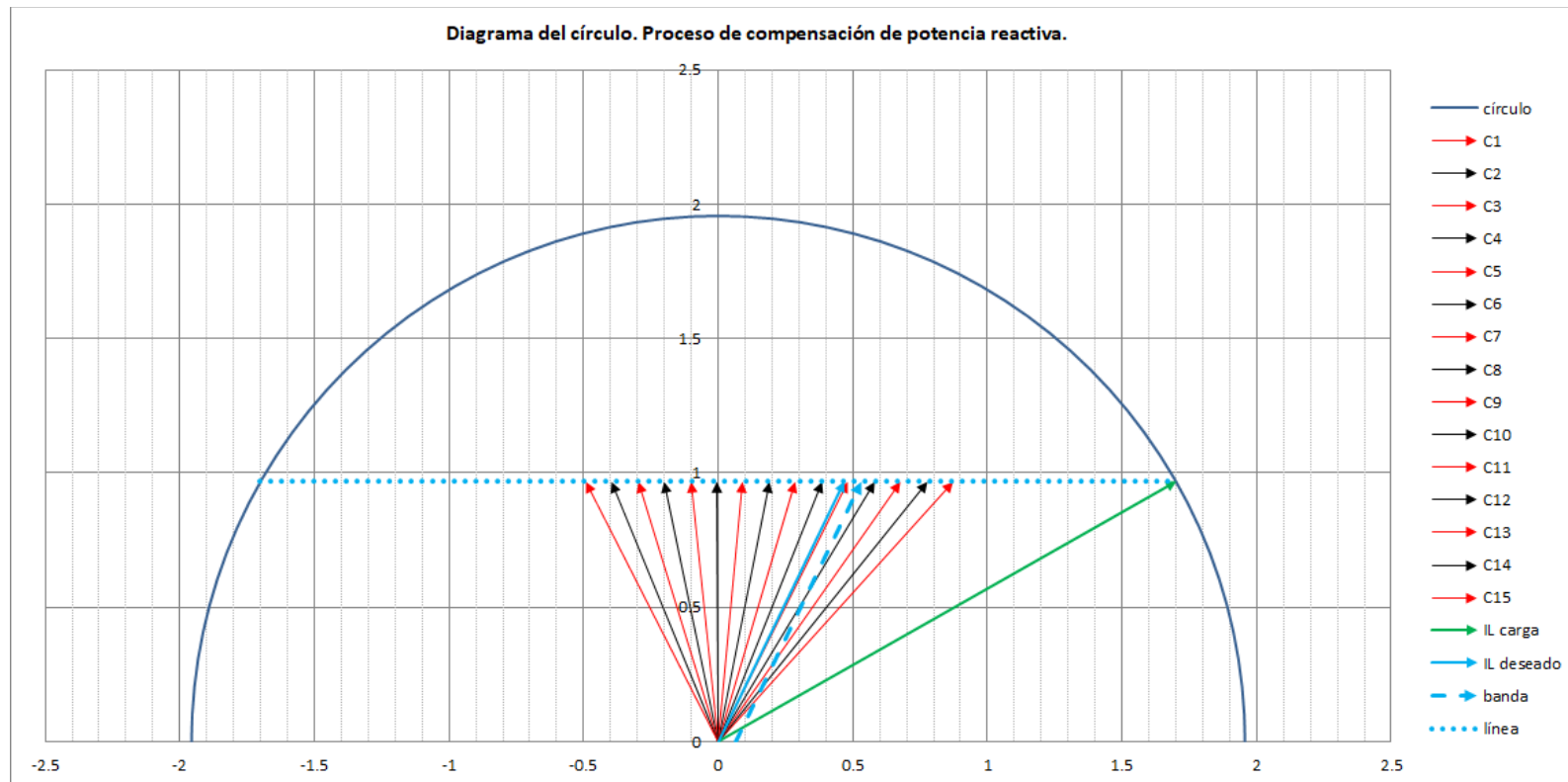


Figura g Diagrama del círculo (las 15 combinaciones) usando los valores **teóricos** del banco **A+B**. **Medición 10** de las tablas **b** y **c** del **complemento: Práctica 2**. Conexión Y.

f_p = de 0.494009408 inductivo a 0.9 inductivo, $c/k = 0.064356504A$.

El banco **B** está totalmente conectado al sistema y recuerde que el controlador de potencia reactiva solo tiene control del banco **A**.

Explicación (figura g): El proceso termina con la combinación 5, el fasor de corriente compleja está dentro de la banda c/k , el f_p al que se encuentra este fasor: 0.894806419 inductivo.

Objetivo 2

b)

P1 ¿Al conectar el motor síncrono al circuito eléctrico fue posible que el $\text{fp} = 1$? **No.**

Tabla **f** Valores medidos. Motor síncrono en vacío.

$$I_e = 1 \text{ A}, E_L = 224 \text{ V}$$

I_L A	$W_{1\text{lf}}$ W	$\text{Var}_{1\text{lf}}$ var	δ_m °	Condición de operación
0.2	20	-15	-2	condensador

Tabla **g** Valores calculados. Motor síncrono en vacío.

$R_{S35^\circ\text{C}}$ Ω	X_s Ω
10.375	63.902

Tabla **h** Valor calculado (predicción). Motor síncrono en vacío.

$$E_{oL} = E_L = 224 \text{ V}$$

δ_e (°)
4.382

Tabla **i** Valores calculados (predicción). Motor síncrono en vacío.

$$E_{oL} = E_L = 224 \text{ V}$$

δ_e (°)	$W_{1\text{lf}}$ (W)	$\text{var}_{1\text{lf}}$ (var)
-4.382	19.607	-2.418

Tabla **j** Valores calculados (valores exactos). Motor síncrono en vacío.

$$I_e = 1 \text{ A}, E_L = 224 \text{ V}$$

E_{of} (V)	
E_{of}	$\angle \delta_e$
135.587	-4.689

I_L (A)		E_3 (V)	
I_L	°	E_3	°
0.193	36.869	12.514	117.647

$W_{1\text{lf}}$ (W)	$\text{var}_{1\text{lf}}$ (var)	$W_{2\text{lf}}$ (W)	$\text{var}_{2\text{lf}}$ (var)
20	-15	19.612	-17.387

δ_m (°)
-2.344

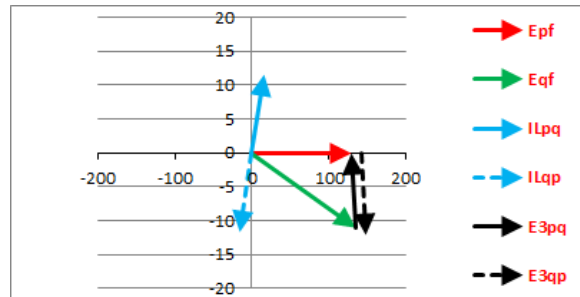


Figura h Diagrama fasorial del motor síncrono en vacío.

c)

P2 ¿Cuanta potencia Q_{3f} suministró el condensador síncrono para que el fp sea 1? -45var.

P3 ¿Cuanta potencia Q_{3f} (valor **calculado**) suministró el condensador síncrono para que el fp sea 1? -39var.

Tabla k Valores **medidos** de capacitancias y potencias reactivas del banco B.

bloque	capacitor F	$X_{c/f}$ Ω	Q_{1f} capacitor var	Q_{3f} capacitor var
1	3.17E-07	8362.666667	2	6
2	7.93E-07	3345.066667	5	15
3	2.70E-06	983.8431373	17	51
4	7.14E-06	371.6740741	45	135
Suma			207	

Tabla l Valores **medidos** de capacitancias y potencias reactivas del banco A+B.

Banco A+B		Q_{1f} capacitor	Q_{3f} capacitor
Combinación	bloque	var	var
1	1	57	171
2	2	67	201
3	1+2	72	216
4	3	92	276
5	1+3	97	291
6	2+3	107	321
7	1+2+3	112	336
8	4	142	426
9	1+4	147	441
10	2+4	157	471
11	1+2+4	162	486
12	3+4	182	546
13	1+3+4	187	561
14	2+3+4	197	591
15	1+2+3+4	202	606

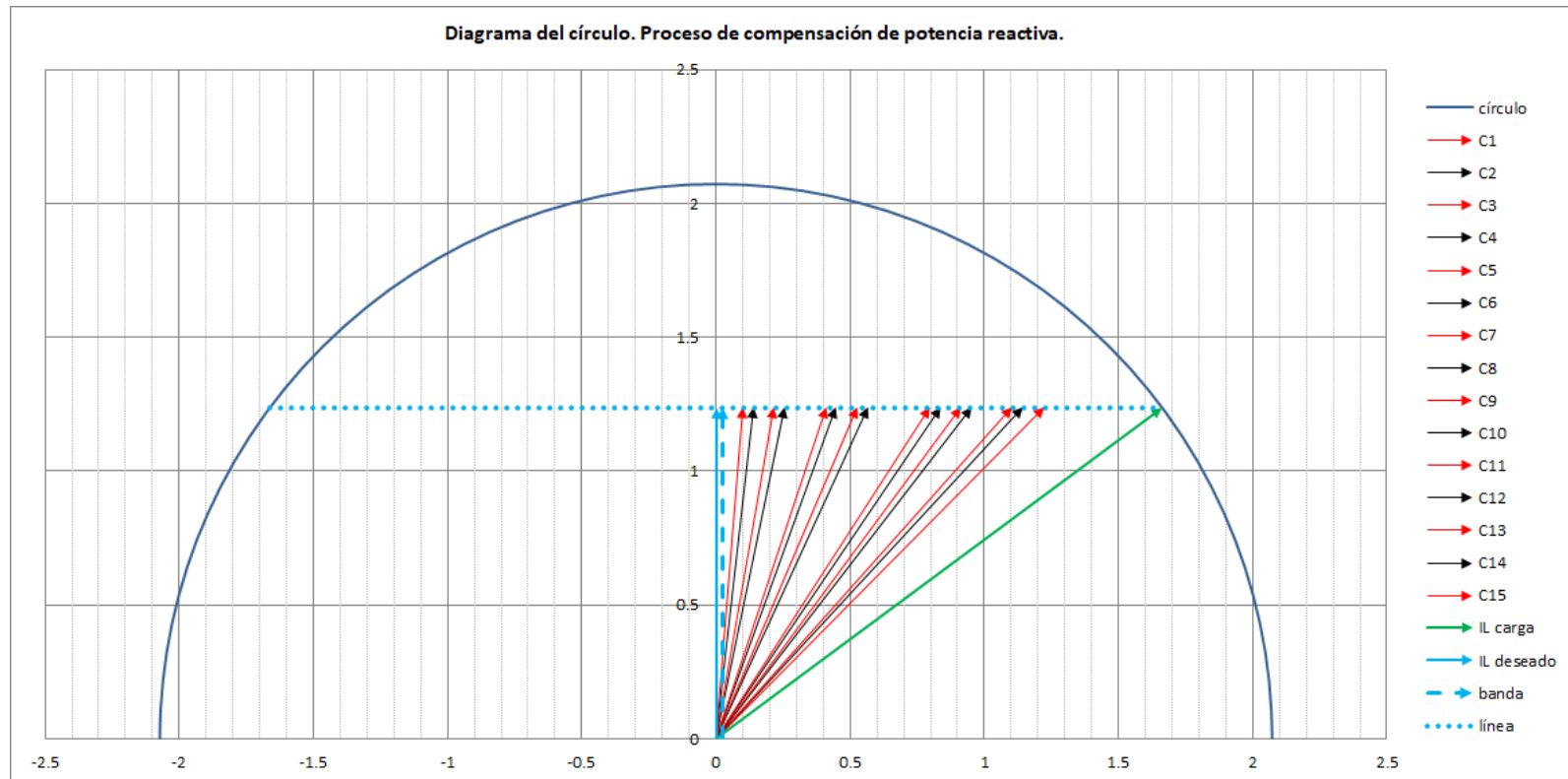


Figura i Diagrama del círculo (las 15 combinaciones) usando el dato nominal y los valores de la tabla j. Conexión Y.

f_p = de 0.597010769 inductivo a 1, = 0.02551682A.

El fasor de corriente compleja (combinación 15) está fuera de la banda c/k, indique el f_p al que se encuentra este fasor: 0.996715472 inductivo.

Explicación (figura i): La combinación 15 está fuera de la banda c/k. El controlador de potencia reactiva registra una componente de potencia reactiva inductiva y el led “IND” enciende.

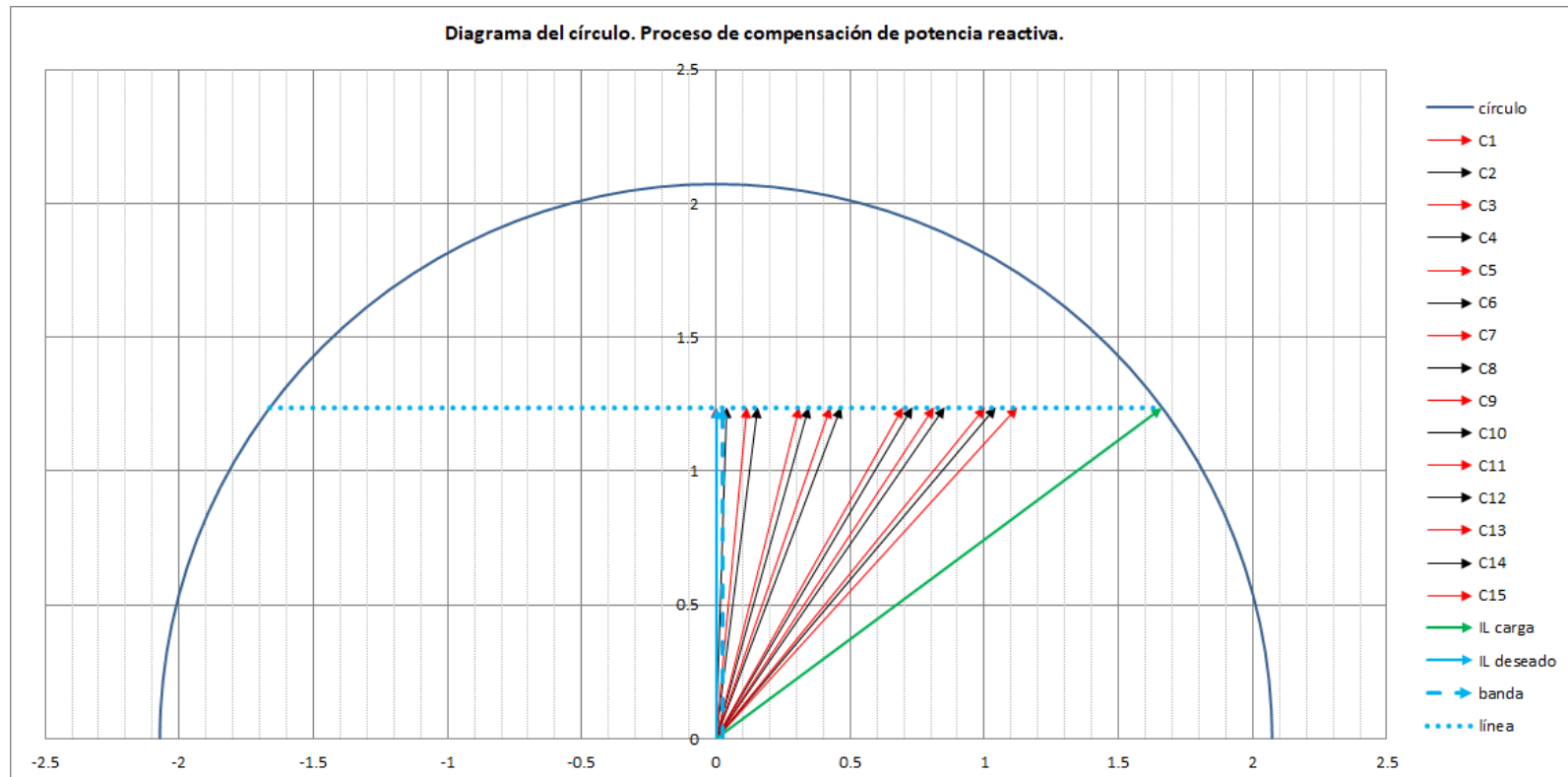


Figura j Diagrama del círculo (las 15 combinaciones) usando el dato nominal y los valores de la tabla j adicionando la potencia Q que el condensador síncrono debe suministrar (valor **calculado**) para que el factor de potencia sea **1**. Conexión Y.

$fp = 0.597010769$ inductivo a 1, $c/k = 0.02551682A$.

El fasor de corriente compleja (combinación 15) está empalmado con el fasor de corriente compleja al factor de potencia deseado de **1**.

Explicación (figura j): El proceso termina con un factor de potencia deseado exacto de 1. El controlador de potencia reactiva no registra ninguna componente de potencia reactiva inductiva o capacitiva y los leds "IND" o "CAP" no encienden.

Tema 5

"Motores especiales"



5.1 Elementos básicos de los motores monofásicos

La figura 1 muestra el esquema de conexión básico de un motor con condensador de arranque. Se componen de un rotor de jaula de ardilla (idéntico al de un motor trifásico) y un estator.

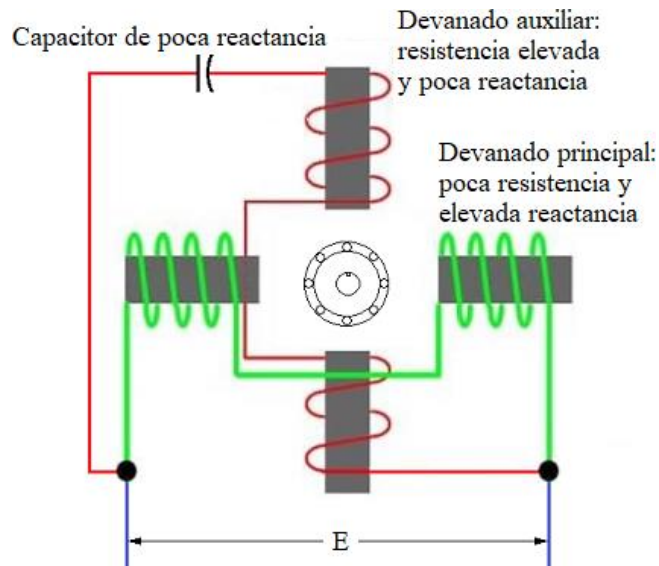


Figura 1 Esquema de conexión básico del motor con condensador de arranque. 2 polos principales y 2 polos auxiliares.

En el estator se alojan los devanados principal y auxiliar, el devanado auxiliar tiene el mismo número de polos que el devanado principal y quedan montados sobre los del devanado principal como se muestra en la figura 2. En la figura 2 el estator cuenta con 4 polos principales y cuatro polos auxiliares.

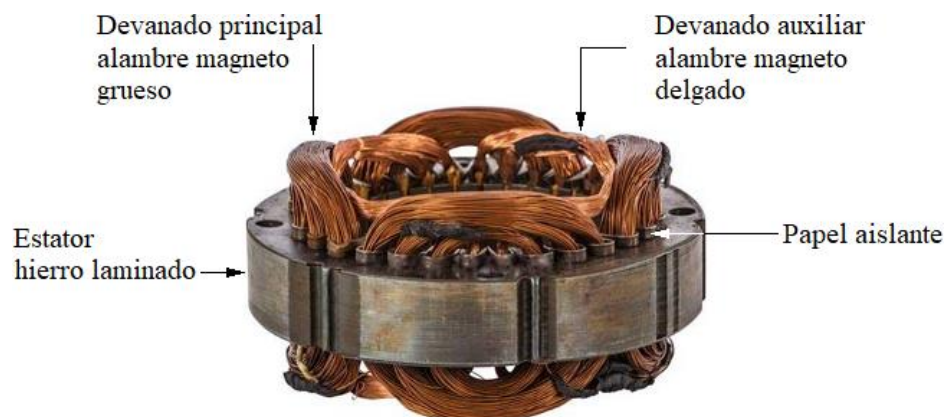


Figura 2 Estator laminado de 32 ranuras.

La figura 3 muestra las partes de un motor con condensador de arranque.

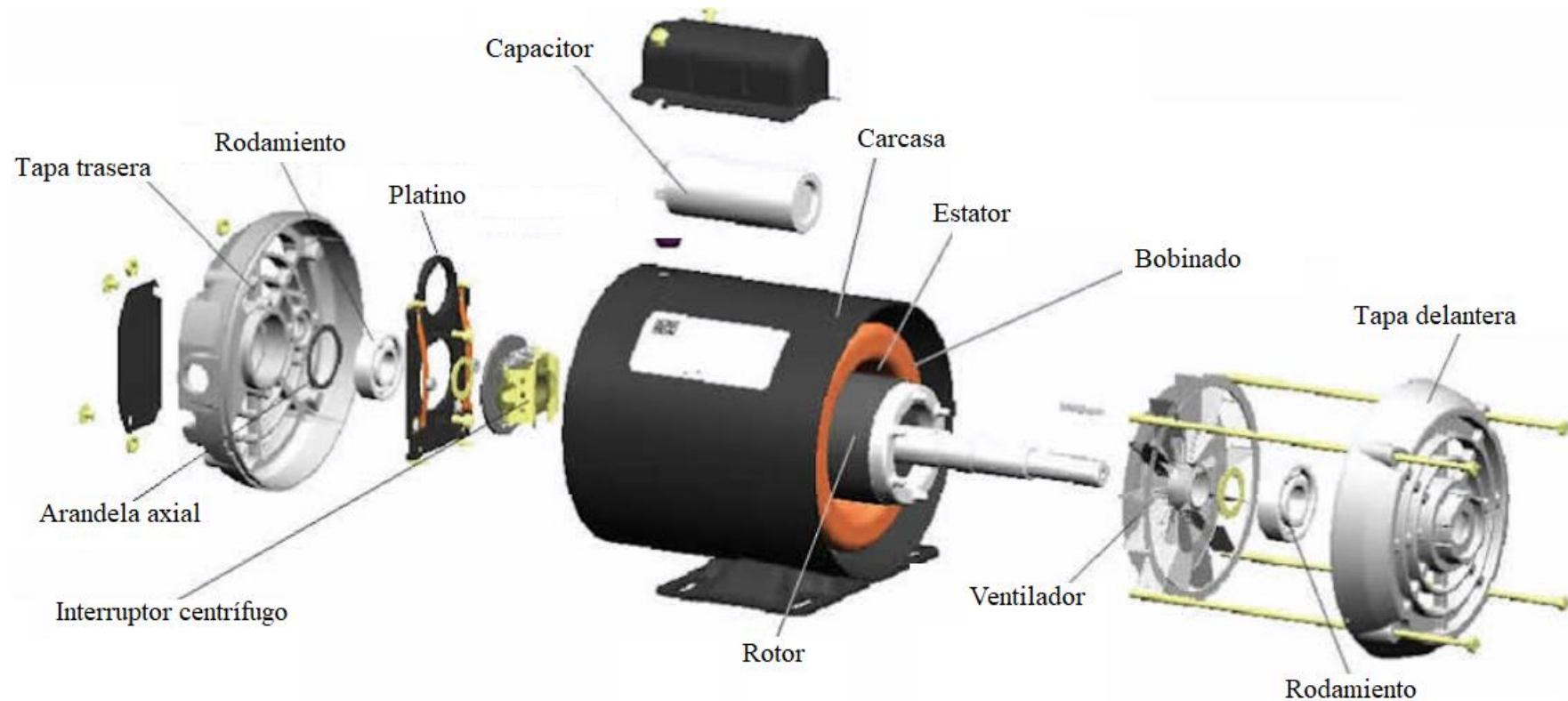


Figura 3 Partes del motor con condensador de arranque.

En el **complemento: Problema 1** se muestra el devanado desplegado del motor de inducción monofásico con condensador de arranque. Este motor es utilizado en el **complemento: Práctica 1**.

La figura 4 muestra los tipos de motores monofásicos según el rotor.

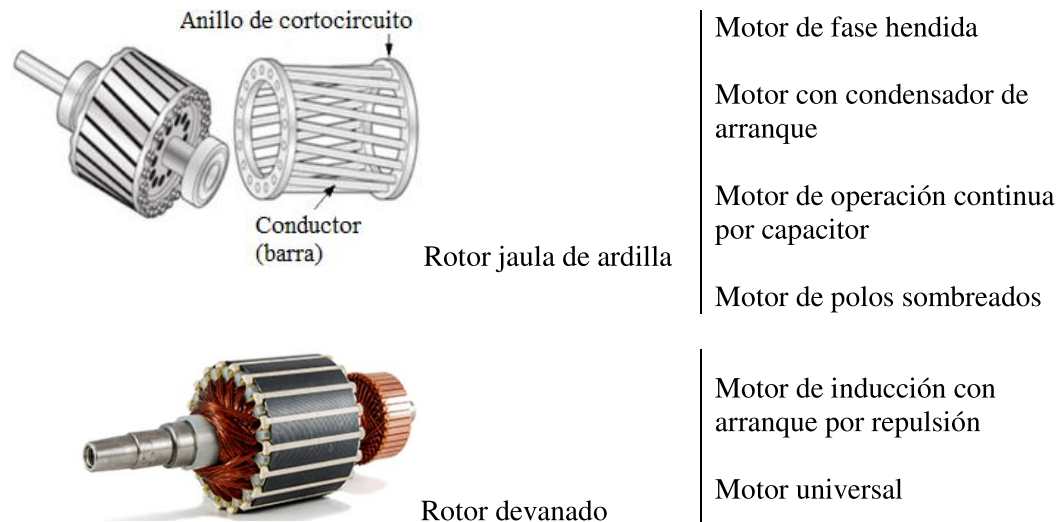


Figura 4 Tipos de motores monofásicos según el rotor.

5.2 Principio de operación del motor monofásico de inducción

El motor monofásico de inducción opera empleando el fenómeno de inducción electromagnética. La acción es similar a la de un transformador, con el estator representando el devanado primario, y el rotor el devanado secundario. Este formado por un circuito magnético y dos eléctricos. El circuito magnético está formado por el estator, donde se coloca el bobinado inductor y el rotor que incorpora el bobinado inducido, que en la mayoría de los casos suele ser una jaula de ardilla. De su nombre se desprende que utiliza un solo bobinado inductor, recorrido por una corriente alterna que crea un campo magnético pulsante, pero de dirección constante que, por sí solo, no es capaz de hacer girar al rotor. Si el rotor se encuentra ya girando, en los conductores de la jaula de ardilla se generan fuerzas electromotrices que hacen que por las barras circulen corrientes, que a su vez generan un flujo de reacción desfasado respecto del principal. La interacción entre estos dos flujos hace que el motor se comporte como un motor “bifásico” y el rotor continúe girando.

5.3 Arranque de los motores monofásicos de inducción

El motor monofásico es incapaz de arrancar por sí solo pero, si se pone en marcha, se mantiene funcionando de forma normal hasta su desconexión. Por ello, hay que dotar a dicho motor de un dispositivo adecuado para iniciar el arranque. El más utilizado es incorporar al estator un bobinado auxiliar que funciona durante el periodo de arranque y que se desconecta una vez que el motor está en funcionamiento. En estas condiciones, el motor en el arranque es un motor “bifásico”, con sus bobinados desfasados 90° eléctricos, que hace que el motor se ponga en marcha. Una vez alcanzada el 85% de la velocidad final se desconecta el bobinado auxiliar de forma que queda funcionando como motor monofásico. Para realizar la desconexión del bobinado auxiliar, se utiliza un interruptor centrífugo acoplado en el eje del motor.

El motor monofásico tiene un rendimiento, par de arranque y factor de potencia bajos. Para compensar dichos valores, se recurre a conectar en serie con el bobinado auxiliar un condensador

electrolítico no polarizado, con lo que se consiguen valores de rendimiento y par de arranque mucho mejores.

5.4 Devanados de fase partida (motor monofásico de fase hendida)

La figura 5 muestra el esquema de conexión básico de un motor monofásico de fase hendida. Se componen de un rotor de jaula de ardilla (idéntico al de un motor trifásico) y un estator.

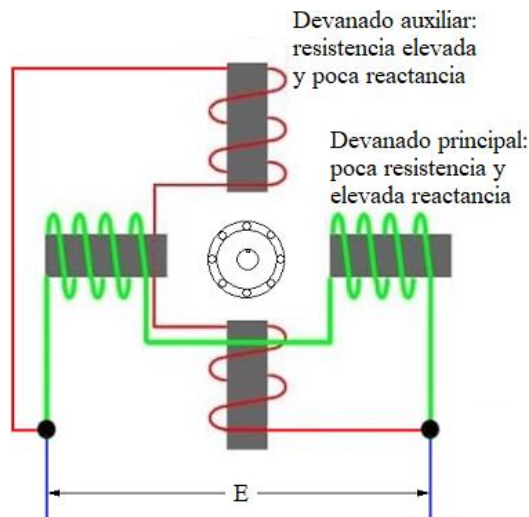


Figura 5 Esquema de conexión básico del motor monofásico de fase hendida. 2 polos principales y 2 polos auxiliares.

Si la potencia monofásica que se utiliza en las casas se va a usar para arrancar y operar un motor de corriente alterna, es necesario hacer algo para producir dos fases. Por lo general, el medio para derivar dos fases, o sea, para efectuar la división de fase forman parte del circuito del estator del motor de corriente alterna. La potencia “bifásica” crea el campo magnético giratorio.

El método es emplear un devanado auxiliar especial (devanado de arranque) integrado dentro del estator, para diferenciarlo del devanado de operación (devanado de principal) del estator. En motores de corriente alterna de fase hendida (partida), **el devanado de arranque se utiliza solo para poner en marcha el motor, y tiene una resistencia elevada y poca reactancia inductiva. El devanado de principal tiene poca resistencia y elevada reactancia.** Cuando se aplica inicialmente la potencia, los dos devanados se energizan. Debido a sus diferentes impedancias, la corriente del devanado de operación se atrasa con respecto a la corriente del devanado de arranque, creándose una diferencia de fase entre las dos. Lo ideal sería que la diferencia de fase fuese de 90° , pero usualmente es mucho menor. No tan defasados entre sí; no obstante, se produce un campo magnético giratorio en el estator, esto produce un par en el rotor, con lo cual el motor arranca.

Cuando el motor alcanza la velocidad de operación (velocidad final), el rotor puede seguir al campo magnético creado por el devanado principal, y ya no se necesita el campo del devanado de arranque (el motor continúa en operación porque el rotor produce un campo magnético que se denomina *campo magnético transversal*; el cual contribuye para un campo magnético giratorio). El devanado de arranque es desconectado por medio de un dispositivo mecánico denominado interruptor centrífugo, ya que funciona a base de fuerza centrífuga creada por la velocidad del rotor. Una vez que el motor esta arrancado y operando, el motor monofásico de inducción de fase

hendida desarrollará el par mediante la acción del *campo magnético transversal* creado por el rotor. Mientras gira el rotor, los voltajes se inducen en las barras del rotor, porque éstos son conductores cortando a través de líneas de flujo magnético. Estos voltajes están en fase con la corriente de excitación del estator. Los voltajes inducidos en el rotor hacen fluir la corriente del rotor. La impedancia del rotor es casi enteramente reactiva, así que la corriente se atrasa en relación al voltaje por casi 90° . De esta manera el rotor crea el *campo magnético transversal*, el cual se desplaza 90° del campo creado por el devanado del estator. Así que, la interacción de los campos magnéticos pulsante y transversal crean al campo magnético giratorio girando a velocidad síncrona.

La corriente del rotor se induce por el campo magnético giratorio, así que las escobillas no son necesarias. Al crearse el campo magnético giratorio, sus líneas de fuerza cortan por las barras del rotor, las cuales son conductoras metálicas de baja resistencia. Las corrientes parásitas se inducen en las barras del rotor. Estas corrientes fluyen en una dirección, para oponerse al movimiento del campo magnético giratorio (Ley de lenz. La corriente inducida será en tal dirección que se opone al movimiento que la genera). La velocidad del rotor debe ser menor que la del campo magnético giratorio, porque debe haber movimiento relativo entre el rotor y el campo magnético, para inducir las corrientes hacia las barras del rotor y hacer girar continuamente el rotor. Si el rotor girara a la misma velocidad del campo magnético giratorio pararía. A medida que la máquina es cargada la velocidad disminuye, el campo magnético giratorio aumenta su intensidad y el par mecánico aumenta.

Cuando se aplica potencia a un motor de inducción de fase hendida, tanto el devanado de operación como el de arranque toman una corriente de carga que es de 4 a 5 veces mayor que la nominal. Como resultado, el periodo de arranque debe ser corto para evitar que se sobrecalientes los devanados. Las elevadas corrientes de arranque producen también una corriente proporcionalmente elevada en el rotor jaula de ardilla, de tal modo que el motor se calienta con mucha rapidez durante el arranque. El alambre magneto de diámetro pequeño que se utiliza en el devanado auxiliar de los motores de fase hendida, es especialmente vulnerable al sobrecalentamiento y, si no se desconecta de la línea de alimentación puede quemarse, pasados 4 o 6 segundos.

El sentido de giro de un campo magnético giratorio de fase hendida se puede invertir, invirtiendo las conexiones del devanado de arranque. La corriente por el devanado auxiliar cambia de dirección creando un campo magnético giratorio en sentido opuesto.

La velocidad del motor depende esencialmente de la frecuencia de la línea de alimentación de corriente alterna y del número de polos del estator (ecuación 2 del **subtema 4.1 Tema 4**).

El motor de fase hendida, al igual que cualquier motor monofásico de inducción, vibra mecánicamente al doble de la frecuencia de la línea de alimentación.

Además el devanado auxiliar está desplazado físicamente del devanado principal, hacia un punto central entre los dos polos principales del estator. Para un motor de 2 polos el desplazamiento será de 90° , para un motor de 4 polos de 45° , y para un motor de 6 polos de 30° . Los grados mecánicos son una medida de las posiciones físicas relativas con respecto a un círculo de 360° . Los grados eléctricos son vectoriales y miden la velocidad angular, o el tiempo requerido para completar un ciclo completo. En un motor de dos polos, un ciclo completo o el movimiento del polo positivo a

través del polo negativo y la vuelta al polo positivo es de 360° eléctricos, los cuales también son 360° mecánicos. En un motor de 4 polos, un ciclo completo, o 360° eléctricos, se extiende de un polo positivo, a través de un polo negativo, hacia otro polo positivo, que es de 180° mecánicos. De lo anterior:

$$^{\circ}\text{eléctricos} = (p/2) ^{\circ}\text{mecánicos} \quad 1$$

Donde:

p número de polos de la máquina

Funcionamiento del motor de inducción. El funcionamiento del motor de inducción puede ser determinado con el método directo registrando las características (curvas de factor de potencia, de eficiencia, de corriente absorbida y de velocidad como función de la potencia de salida) y de la característica mecánica (par como función de la velocidad) cargando la flecha del motor por medio de un freno.

5.5 Arranque por capacitor (motor con condensador de arranque)

Para el motor monofásico de fase hendida se señaló que la diferencia de fase entre las corrientes de los devanados de operación y arranque era mucho menor que 90°. El par de arranque desarrollado en un motor que utiliza un estator de fase hendida tampoco alcanza el máximo que se podría obtener si se tuviera una diferencia de fase ideal, o sea, de 90°.

Se puede obtener una variación de fase más cercana a los 90°, mediante el sistema de arranque por capacitor para crear un campo magnético giratorio en el estator. Este sistema, que es una modificación del método de fase hendida, utiliza un capacitor de poca reactancia conectado en serie con el devanado de arranque del estator a fin de proporcionar una variación de fase de aproximadamente 90° para la corriente de arranque, dando como resultado un par de arranque muy superior al obtenido en el sistema normal de fase hendida. Los motores con arranque por capacitor tienen las mismas características de operación que sus equivalentes de fase hendida.

El capacitor y el devanado de arranque se desconectan mediante un interruptor centrífugo, como se explicó en el caso del motor normal de fase hendida. Para invertir el sentido de rotación de un motor con arranque por capacitor, se hace lo mismo que en el caso del motor de fase hendida, esto es, se invierten las conexiones de los cables al devanado de arranque u operación.

Por lo tanto, el motor monofásico de inducción de fase hendida obtiene la diferencia de fase disminuyendo la reactancia y aumentando la resistencia del devanado auxiliar con respecto al devanado principal. Como resultado, la corriente a través del devanado auxiliar está más aproximadamente en fase con el voltaje, que la corriente que fluye por el devanado principal. Las corrientes producen campos magnéticos que son desplazados por la diferencia del ángulo de fase de las corrientes (aproximadamente 30°). El motor por arranque por capacitor tiene un *capacitor electrolítico no polarizado* en serie con el devanado auxiliar. **El valor del capacitor es seleccionado cuidadosamente, para que su reactancia, en combinación con la reactancia del devanado auxiliar, resulte en un ángulo de fase de corriente de aproximadamente de 90° entre los devanados de arranque (auxiliar) y operación (principal).** Puesto que el par de arranque es proporcional al seno del ángulo de fase, se obtiene un par de arranque muy superior al obtenido en sistema de fase hendida. La diferencia entre los dos motores envuelve únicamente el sistema de arranque; una vez

que hayan alcanzado la velocidad, el devanado de arranque se desconecta, y operan en los devanados principales.

Capacidad del capacitor según la potencia del motor con condensador de arranque

La capacidad de los capacitores que se conectan en serie con la bobina auxiliar para el arranque tienen una relación con los amperes de trabajo del motor a 127V y es de 35.37 μ F por cada amper. Para checar los capacitores directamente con la línea de 127V, deben dar 0.047A por cada μ F. La tabla 1 muestra la capacidad de los capacitores y corriente para checar.

Tabla 1 Capacidad de los capacitores y corriente para checar.

Hp	Amperaje del motor	μ F para arranque	Amper a 127V para checar
1/6	3.5	125	6
1/4	4.5	160	7.5
1/3	5.5	200	9.5
1/2	7.4	260	12
2/4	10.2	360	17
1	13	460	21.5
1 1/2	18	650	30.5

5.6 Operación continua por capacitor (motor con condensador de marcha)

Los motores monofásicos son todos un tanto ruidosos debido a que vibran a 120Hz cuando funcionan en una línea de alimentación de 60Hz. Ninguno de los medios para reducir este ruido, por ejemplo, las monturas de hule elástico, han sido efectivos para eliminar totalmente esta vibración, sobre todo cuando el motor está acoplado directamente a un ventilador grande que tiende a resonar.

El motor de operación continua por capacitor es muy útil en este tipo de aplicaciones, porque su diseño permite eliminar gran parte de las vibraciones cuando trabaja a plena carga. El capacitor sirve para variar la fase de la corriente de uno de los devanados, de modo que la corriente en un devanado esté defasado 90° con respecto a la corriente en el otro devanado, gracias a lo cual el motor de operación continua por capacitor funcione realmente como un aparato “bifásico” con carga nominal. Puesto que el capacitor forma parte del circuito en todo momento, no se requiere interruptor centrífugo.

Cuando el motor funciona en vacío, es siempre mas ruidoso que a plena carga, debido a que solo opera como verdadero motor “bifásico” cuando lo hace a plena carga. Si se escoge el valor adecuado de capacitancia, las corrientes que pasan por cada uno de los dos devanados iguales del estator, a plena carga, serán tales que el factor de potencia del motor se acerque al 100%. Sin embargo, su par de arranque es bajo y, por lo tanto, el motor de operación continua no es adecuado para condiciones difíciles de arranque.

El motor de operación continua por capacitor brinda una cantidad de ventajas que no ofrecen los motores de inducción del tipo de fase hendidada y del tipo con arranque por capacitor. La presencia del capacitor en serie con el segundo devanado del estator resulta en una diferencia de fase cercana

a 90° entre las corrientes de los dos devanados del estator. El segundo devanado, por lo tanto crea en parte, o en todo, *el campo magnético transversal*, el cual, sin el segundo devanado, se crea por las corrientes del rotor. Esto reduce, o elimina, tanto las corrientes magnetizantes en el rotor, como las asociadas pérdidas en el cobre, y por lo tanto aumenta la eficiencia del motor. A plena carga el par es relativamente constante, en vez de pulsante a 120 Hz, así que el motor de operación continua por capacitor opera con menos vibración y ruido, y con un factor de potencia superior que el de los otros dos tipos de motores.

5.7 Motor universal

El motor universal de CA/CD se utiliza en herramientas portátiles tales como taladros, sierras, pulidoras eléctricas, etc., y también en aparatos caseros tales como aspiradoras, batidoras, licuadoras, etc., en los que la alta velocidad, mucha potencia y tamaño pequeño constituyen una ventaja.

Básicamente es más semejante al motor de corriente directa que al de corriente alterna y tiene ciertas desventajas que se pueden evitar en motores de inducción de corriente alterna. La principal desventaja consiste en que necesita conmutación y escobillas.

El motor universal es fundamentalmente un motor de corriente directa serie diseñado especialmente para funcionar con corriente alterna y con corriente directa. Un motor serie normal de corriente directa funciona muy deficientemente en corriente alterna, debido sobre todo dos razones:

- a) La alta reactancia de los devanados de armadura y campo limitan la corriente de corriente alterna a un valor mucho menor que la corriente directa (para el mismo voltaje de línea) y
- b) Si se usa acero sólido para el yugo (localizado en el estator), el flujo de corriente alterna producirá grandes corrientes parásitas en él y, por lo tanto, se calentará.

La reactancia del devanado de armadura puede reducirse colocando un devanado de compensación en el estator, de tal modo que los flujos se opongan o “anulen” entre sí. Este mismo devanado de compensación se puede conectar en serie con el de la armadura. En este caso se dice que el motor está *conductivamente compensado*. En estas condiciones, el motor universal tendrá características de operación similares, ya sea que funcione en corriente alterna o en corriente directa.

El devanado de compensación puede conectarse en corto circuito para que se comporte como el secundario de un transformador en corto circuito (el devanado de armadura actúa como primario). La corriente inducida de corriente alterna en el devanado de compensación produce un flujo que se opone o “neutraliza” al de la corriente de armadura y se dice que el motor está *inductivamente compensado*. La reactancia del devanado de compensación se puede mantener en un valor bajo limitando el número de vueltas.

De lo anterior, para asegurar la operación satisfactoria del motor universal usando una fuente de potencia de corriente alterna, se requieren algunas modificaciones. La reactancia del devanado de campo serie y el de la armadura se puede reducir un poco por el uso de menos vueltas de alambre de diámetro grande; sin embargo, no sería práctico eliminar la caída de voltaje de la reactancia, debida al campo en serie, porque eso resultaría en la eliminación del campo magnético. La caída

de voltaje de la reactancia debida a los devanados de la armadura pueden ser prácticamente eliminadas por el uso de un devanado de compensación. El devanado de compensación se conecta en serie con la armadura (*compensación conductiva*) y está arreglado de tal manera que los ampere-vuelta del devanado de compensación oponen y neutralizan los ampere-vuelta de la armadura. Para realizar esta compensación, el devanado de compensación se desplaza 90° eléctricos del devanado de campo. Para un motor de 4 polos, el desplazamiento mecánico es de 45° . El devanado de compensación también mejora considerablemente la conmutación. Esto es una gran ventaja, ya que el campo de un motor universal ha sido debilitado al bajar la reactancia del devanado de campo en serie. Si el devanado de compensación está cortocircuitado (*compensación inductiva*), las corrientes alternantes en la armadura se inducen por la acción del transformador hacia adentro del devanado de compensación cortocircuitado, y de esta manera, efectivamente cancelan las corrientes reactivas de la armadura. Para reducir las pérdidas debidas a histéresis y las corrientes parásitas de Foucault, la estructura del campo, en vez de ser sólida, es laminada. Pocos motores universales operan a la misma velocidad con corriente alterna como con corriente directa. En cuanto a la velocidad que alcanza el motor usando corriente alterna en relación con corriente directa depende de su diseño.

El par de arranque de un motor universal queda determinado por la corriente que fluye a través de los devanados de armadura, el devanado de campo en serie y el devanado compensador. Debido a la reactancia inductiva de estos devanados, la corriente de arranque en corriente alterna siempre será menor que la corriente de arranque en corriente directa (con el mismo voltaje de fuente). Por lo tanto, el par de arranque en corriente alterna será menor que en corriente directa.

El devanado de compensación tiene la función importante de reducir la reactancia general del motor, y, además, desempeña la función vital de oponerse a la reacción de armadura, mejorando con esto la conmutación. Al mismo tiempo, aumenta considerablemente el chisporroteo en las escobillas.

5.8 Motor de polos sombreados

La figura 6 muestra el esquema de conexión básico de un motor de polos sombreados.

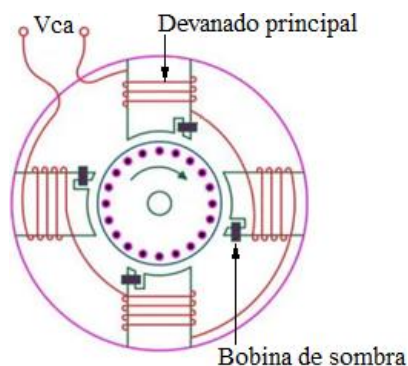


Figura 6 Esquema de conexión básico del motor de polos sombreado. 4 polos principales y 4 polos de sombra.

Este motor es en general pequeño, de potencia fraccionaria no mayor a $\frac{1}{4}$ de Hp. La gran ventaja es ser muy simple, solo un devanado monofásico (principal), un rotor jaula de ardilla y un diseño especial de polos que tiene en los extremos, una ranura en donde se aloja una espira de cobre macizo en corto circuito (bobina de sombra) separada del devanado principal (un polo es un polo

magnético que está físicamente dividido o seccionado, tiene un pequeño corte en donde se aloja una “bobina de sombra” en corto circuito).

El estator tiene polos salientes, cada polo está provisto de su propia bobina de excitación, en este tipo de motores el flujo magnético se desarrolla de una forma distinta que en los motores con dos devanados (auxiliar y principal). La corriente alterna de la alimentación monofásica que circula a través del devanado principal, produce un flujo alterno, parte del flujo a través de cada polo se eslabona con la bobina sombreada; esta bobina produce el flujo en la posición sombreada para pasar por detrás de la porción de polo “no sombreada”, esto da un efecto, un movimiento de flujo a través de la cara del polo, y bajo la influencia de este flujo en movimiento, se desarrolla al par de arranque. Tan pronto como el rotor inicia su rotación bajo la influencia del par de arranque, se crea un par adicional creado por la acción del motor de inducción monofásico. Por lo tanto, el motor se acelera a una velocidad ligeramente debajo de la velocidad síncrona y opera como un motor de inducción monofásico.

5.9 Motor de pasos

Un motor a pasos es un motor de corriente directa sin escobillas que puede ser de imán permanente o reluctancia variable que tiene como características de desempeño rotar en ambas direcciones, moverse con incrementos angulares precisos, sostener un torque de retención a velocidad cero y controlarse con circuitos digitales. El motor paso a paso es muy útil porque se puede posicionar con precisión sin ningún sensor de retroalimentación, por lo tanto, se puede representar como un controlador de circuito abierto.

El número y tasa de los pulsos controla la posición y velocidad del eje del motor. Por lo general, los motores de pasos se fabrican con pasos por revolución de 12, 24, 72, 144, 180 y 200, lo que resulta en incrementos de eje de 30° , 15° , 5° , 2.5° , 2° y 1.8° por paso. A medida que se activan los devanados del motor paso a paso en un orden en particular, se permite que fluya una corriente a través de ellos que magnetiza el estator provocando polos electromagnéticos que causarán la propulsión del motor.

Los motores paso a paso pueden ser bipolares que requieren dos fuentes de poder o una fuente de poder de polaridad conmutable, o unipolares que requieren sólo una fuente de poder (figura 7). Se impulsa mediante una fuente de corriente directa y requieren circuitos digitales para producir secuencias de energización de bobina para la rotación del motor.

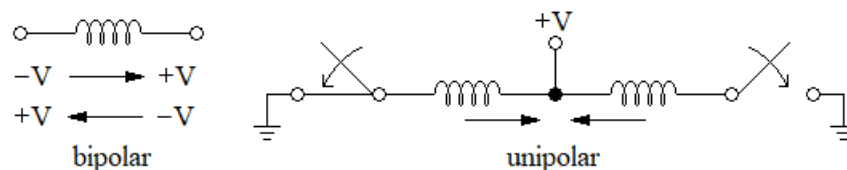


Figura 7 Accionamiento bipolar o unipolar. Los devanados del motor unipolar tienen una derivación central. La toma central se logra mediante un devanado bifilar, un par de cables enrollados físicamente en paralelo, pero cableados en serie.

Bipolares. Presentan un mayor torque, es de menor tamaño, más económico, su control es complicado, requiere una tarjeta con etapas de control en potencia y de giro.

Unipolares. Presenta menor torque, es de mayor tamaño, menos económico, su control es más simple al requerir únicamente un circuito de alimentación.

Los motores pasos a pasos se fabrican de 3 maneras:

- Motor paso a paso de reluctancia variable.
- Motor paso a paso de imán permanente.
- Motor paso a paso híbrido.

Motor paso a paso de reluctancia variable. Cuentan con un rotor ferromagnético, el movimiento del motor paso a paso y su retención resulta de la atracción de los polos del estator y rotor a posiciones con mínima reluctancia magnética que permite el máximo flujo magnético. La ventaja de un motor paso a paso de reluctancia variable es que al tener una menor inercia de rotor provocará una respuesta dinámica más rápida. La figura 8 muestra un motor paso a paso de reluctancia variable de 4 fases (4/2 polos) de una sola pila. Aquí, (4/2 polos) significa que el estator tiene cuatro polos y el rotor tiene dos polos.

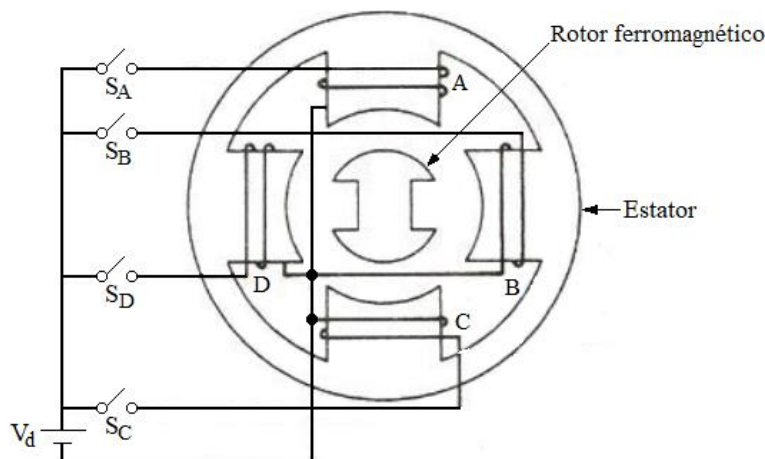


Figura 8 Motor paso a paso de reluctancia variable.

Las cuatro fases A, B, C y D están conectadas a la fuente V_d con la ayuda de un semiconductor, interruptores S_A , S_B , S_C y S_D respectivamente, como se muestra en la figura 8. Los devanados de fase del estator se energizan en la secuencia A, B, C, D, A. El rotor se alinea con el eje de la fase A cuando se energiza el devanado A. El rotor es estable en esta posición y no puede moverse hasta que se desenergice la fase A.

Ahora, la fase B está excitada y la fase A está desconectada. El rotor se mueve 90° en el sentido de las agujas del reloj para alinearse con el campo de entrehierro resultante que se encuentra a lo largo del eje de la fase B. De manera similar, se energiza la fase C, se desconecta la fase B y el rotor se mueve nuevamente 90° para alinearse con el eje de la fase.

Por lo tanto, a medida que las fases se excitan en el orden A, B, C, D, A, el rotor se mueve 90° en cada paso de transición en el sentido de las agujas del reloj. El rotor completa una revolución en 4 pasos. La dirección de la rotación depende de la secuencia de cambio de fase y no depende de la dirección de la corriente que fluye a través de la fase. Por lo tanto, la dirección se puede invertir cambiando la secuencia de fase como A, D, C, B, A.

El ángulo de paso se puede reducir de 90° a 45° en el sentido de las agujas del reloj excitando la fase en la secuencia A, A+B, B, B+C, C, C+D, D, D+A, A.

De manera similar, si la secuencia se invierte como A, A+D, D, D+C, C, C+B, B, B+A, A, el rotor gira en un ángulo de paso de 45° en sentido antihorario.

Aquí, (A+B) significa que los devanados de fase A y B están energizados juntos. El campo resultante está a mitad de camino entre los dos polos. Es decir, forma un ángulo de 45° con el eje del poste en el sentido de las agujas del reloj. Este método de cambiar la excitación de una fase a otra se conoce como *micropasos*. Al usar el motor paso a paso, se pueden obtener valores más bajos del ángulo de paso con varios polos en el estator.

El ángulo de estator “ α_s ” se calcula usando la ecuación 2.

$$\alpha_s = \frac{360^\circ}{N_s} \quad 2$$

Donde:
 N_s número de polos del estator

El ángulo de rotor “ α_r ” se calcula usando la ecuación 3.

$$\alpha_r = \frac{360^\circ}{N_r} \quad 3$$

Donde:
 N_r número de polos del rotor

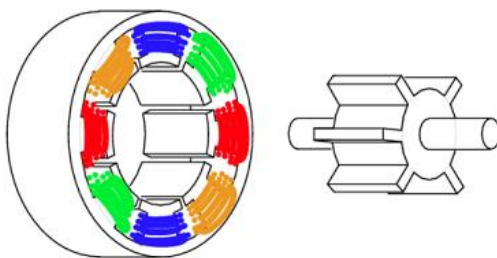
El ángulo de paso “ α ” se calcula usando la ecuación 4.

$$\alpha = \alpha_r - \alpha_s \quad 4$$

El ángulo de paso “ α ” también se puede calcular usando la ecuación 5.

$$\alpha = \frac{N_s - N_r}{N_s N_r} 360^\circ \quad 5$$

La figura 9 muestra un motor paso a paso de reluctancia variable de 4 fases (8/6 polos).



$$\alpha_s = 45^\circ, \alpha_r = 60^\circ \text{ y } \alpha = 15^\circ$$

Figura 9 Motor paso a paso de reluctancia variable de 4 fases (8/6 polos).

El motor está excitado con pila simple y el sentido de rotación es horario como se muestra en la figura 10.

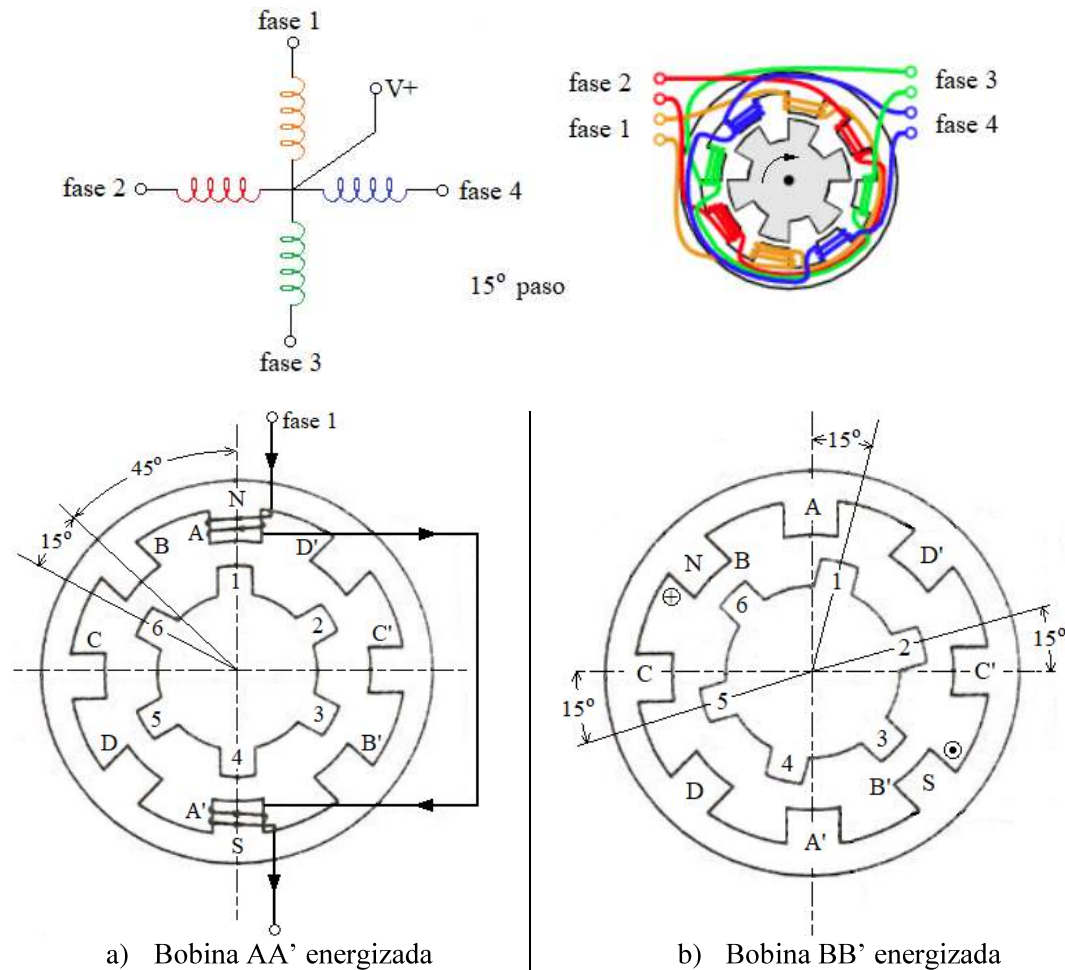


Figura 10 Motor paso a paso de reluctancia variable de pila simple de 4 fases (8/6 polos).
Rotación: horario.

Los polos opuestos están conectados en serie formando 4 fases. El estator tiene 4 polos y el rotor tiene 6 polos. En la figura 10 se ha considerado sólo la fase₁ (devanado AA') para que la explicación sea sencilla. Cuando se excita la bobina AA' (fase₁), los dientes del rotor 1 y 4 se alinean a lo largo del eje del devanado de la fase₁. Así, el rotor ocupa la posición que se muestra en la figura 10a.

Ahora, la fase₁ está desenergizada y el devanado BB' (fase₄) está energizado. Los dientes del rotor 3 y 6 se alinean a lo largo del eje de la fase₄. El rotor se mueve un paso con un ángulo de 15° en el sentido de las agujas del reloj (figura 10b). Además, la fase₄ se desactiva y el devanado CC' (fase₃) se excita. El rotor se mueve de nuevo en un ángulo de 15°.

Se sigue la secuencia fase₁-fase₄-fase₃-fase₂-fase₁ se completan los cuatro pasos de rotación y el rotor se mueve 60° en el sentido de las agujas del reloj. Para una revolución completa del rotor se requieren 24 pasos. Por lo tanto, se puede obtener cualquier ángulo de paso deseado eligiendo diferentes combinaciones del número de dientes del rotor y bobinas de excitación del estator.

La forma de onda para el motor paso a paso de 4 fases (8/6 polos) para una secuencia fase₁-fase₂-fase₃-fase₄-fase₁ se muestra en la figura 11.

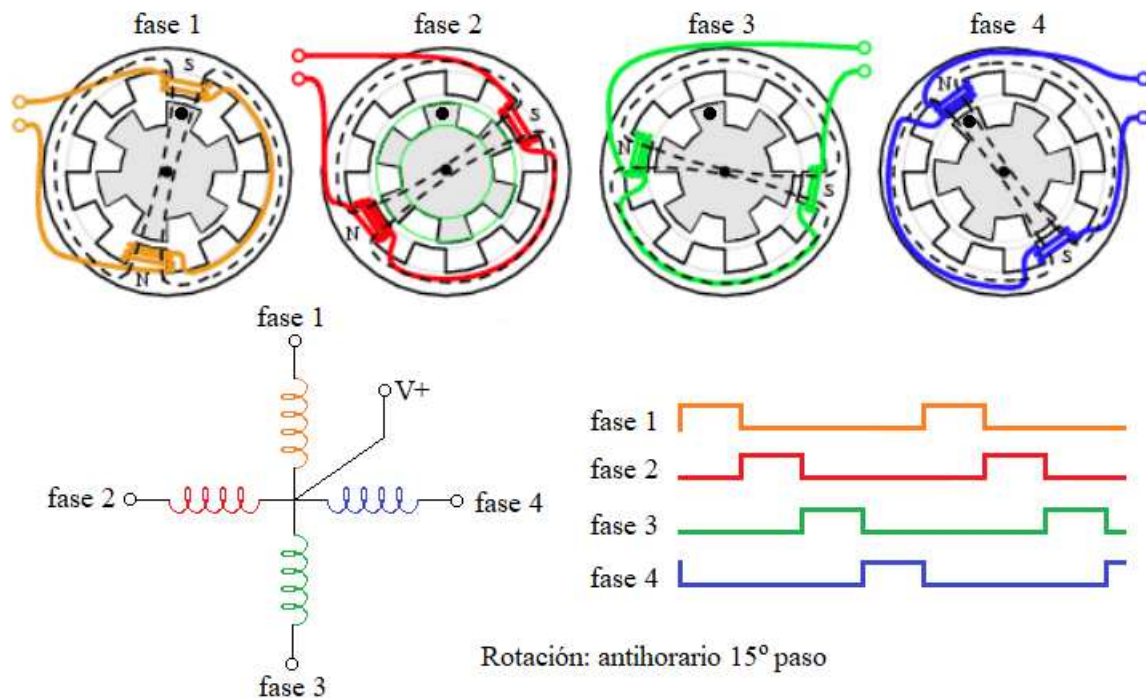


Figura 11 Forma de onda para el motor paso a paso de reluctancia variable de 4 fases (8/6 polos) para una secuencia fase₁-fase₂-fase₃-fase₄-fase₁.

Características del motor paso a paso de reluctancia variable:

- El rotor es un cilindro de hierro blando con polos salientes.
- Este es el motor paso a paso menos complejo y económico.
- El único tipo de motor paso a paso sin par de retención en la rotación manual de un eje de motor desenergizado.
- Ángulo de paso grande.

Motor paso a paso de imán permanente. El estator se conforma de polos devanados y los polos del rotor son imanes permanentes. Al excitar diferentes combinaciones de devanados del estator se mueve y retiene el rotor en diferentes posiciones. Crea polos de polaridad opuestos para su avance. La ventaja que presentan se debe a un pequeño torque de retención residual, llamado momento de detención aun cuando el estator no esté energizado.

La construcción de un motor paso a paso de imán permanente es considerablemente diferente. Es deseable aumentar el número de polos para producir un ángulo de paso más pequeño. También es deseable reducir el número de devanados, o al menos no aumentar el número de devanados para facilitar la fabricación. La figura 12 muestra la construcción de un motor paso a paso de imán permanente de “latas apiladas” de 24 polos.

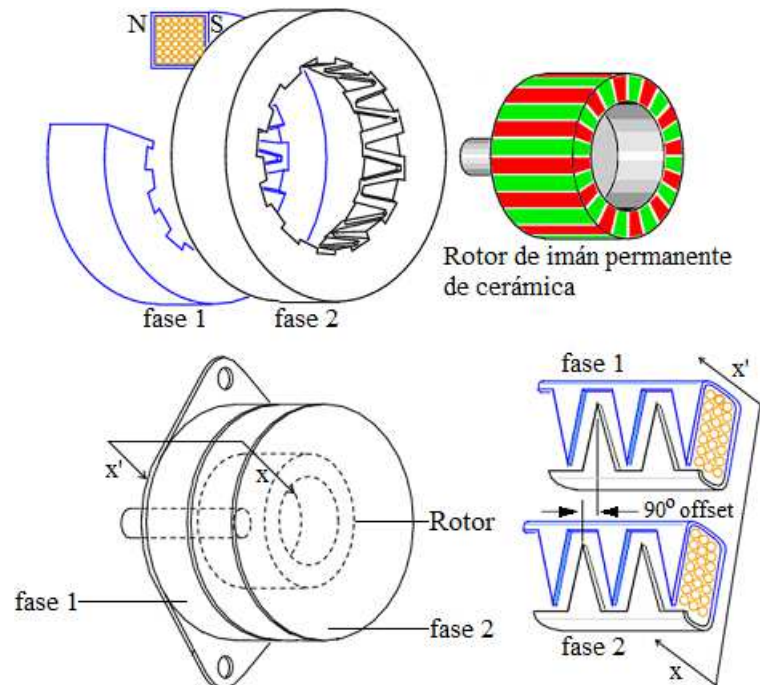


Figura 12 Construcción de un motor paso a paso de imán permanente de pila de lata de 24 polos.

El motor paso a paso de imán permanente de la figura 12 solo tiene 2 fases, pero tiene 24 polos en cada una de las 2 fases. Este estilo de construcción se conoce como can stack (latas apiladas). Los devanados de fase se envuelven con una carcasa de acero dulce, con los polos llevados al centro. Una fase tendrá un lado norte y un lado sur, cada lado envuelve alrededor del centro 12 polos intercalados para un total de 24 polos. Estos polos alternantes norte-sur atraerán al rotor de imán permanente. Si se invirtiera la polaridad de la fase, el rotor giraría $360^\circ / 24 = 15^\circ$. No sabemos en qué dirección. Sin embargo, si energizamos la fase 1 seguido de la fase 2, el rotor se moverá 7.5° porque el devanado de la fase 2 está desplazado (rotado) por 7.5° desde el devanado de la fase 1. El rotor girará en una dirección reproducible si se alternan las fases. La aplicación de cualquiera de las formas de onda anteriores girará el rotor de imán permanente. El desplazamiento rotacional entre los dos devanados de fase es clave para que el rotor siga la conmutación de los campos entre las dos fases.

Características del motor paso a paso de imán permanente:

- El rotor es un imán permanente, es un manguito de ferrita magnetizado con numerosos polos.
- La construcción can-stack proporciona numerosos polos de una sola bobina con polos intercalados de hierro blando.
- Ángulo de paso grande a moderado.
- A menudo se usa en impresoras de computadora para avanzar el papel.

Motor paso a paso híbrido. El motor paso a paso híbrido combina características tanto del motor paso a paso de reluctancia variable como del motor paso a paso de imán permanente para producir un ángulo de paso más pequeño. El rotor es un imán permanente cilíndrico, magnetizado a lo largo del eje con dientes radiales de hierro blando. Las bobinas del estator se enrollan en polos alternos

con los dientes correspondientes. Normalmente hay 2 fases de bobinado distribuidas entre pares de polos.

La figura 13 muestra un motor paso a paso híbrido, 4 fases (8/100 polos).

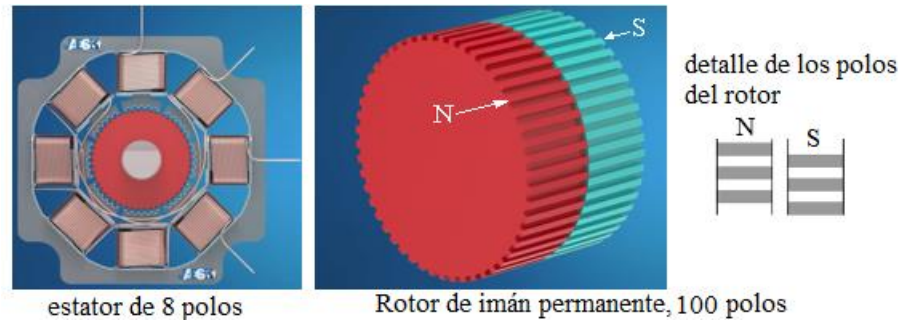


Figura 13 Motor paso a paso híbrido, 4 fases (8/100 polos).

50 dientes en una sección del rotor están desfasados por medio paso de la otra. Debido a este desplazamiento, el rotor efectivamente tiene 100 polos intercalados de polaridad opuesta. Este desplazamiento permite un ángulo de paso de 1.8° al invertir la polaridad de campo de una fase, 200 pasos para cada revolución.

Cada polo tiene 6 dientes. Solo en una pareja de bobinas estos dientes están orientados hacia los dientes del rotor, las otras parejas tienen el paso de los dientes desfasados de un cuarto, la mitad y tres cuartas partes respectivamente (figura 14).

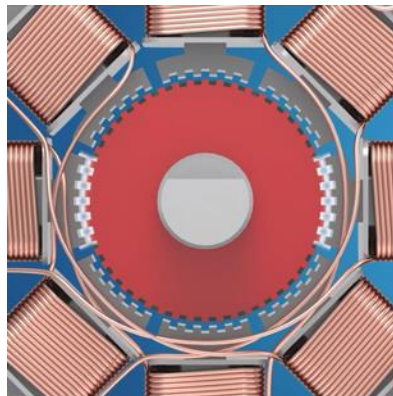


Figura 14 Solo en una pareja de bobinas los dientes están orientados hacia los dientes del rotor, las otras parejas tienen el paso de los dientes desfasados de un cuarto, la mitad y tres cuartas partes respectivamente.

El giro del campo magnético cambia cada 45° (figura 15).

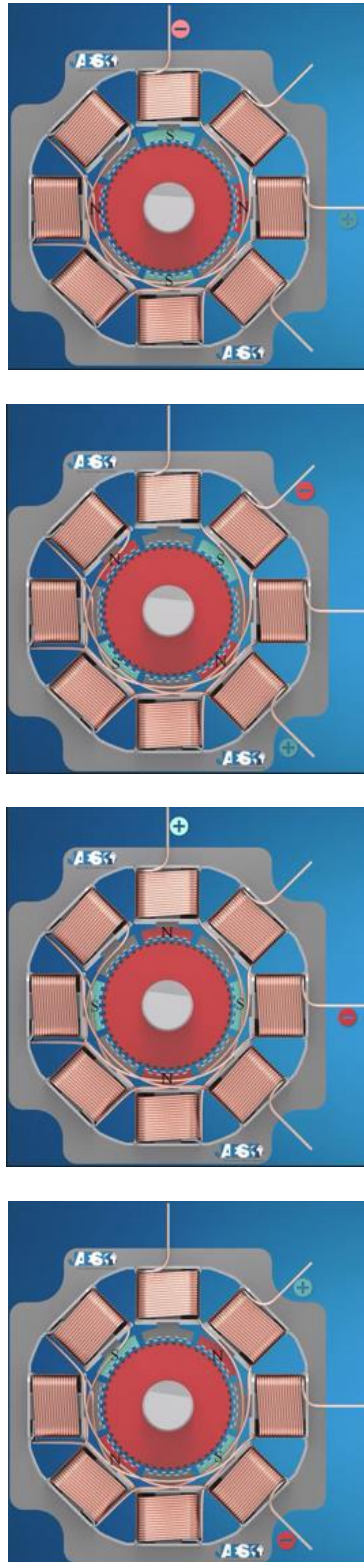


Figura 15 El giro del campo magnético cambia cada 45°.

En cambio el rotor solo gira 1.8° . Esto sucede como podemos observar en la polaridad sur del imán porque los dientes de la polaridad norte del estator se ven atraídos (figura 16), mientras que los dientes de la polaridad norte del rotor defasados 90° se quedarán en la misma posición (figura 17). La figura 18 muestra la interacción entre todas las polaridades.

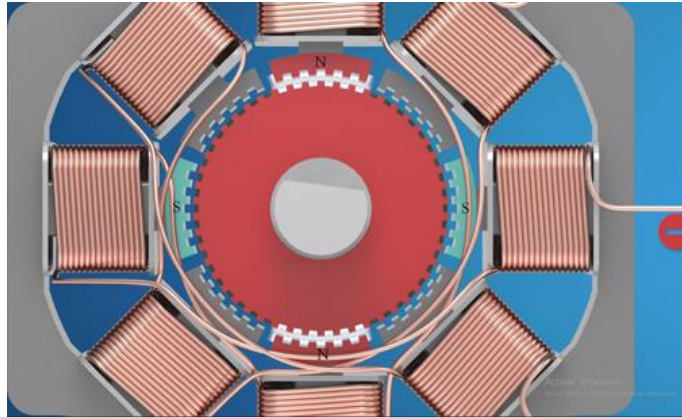


Figura 16 Interacción entre la polaridad sur del imán con la polaridad norte del estator.

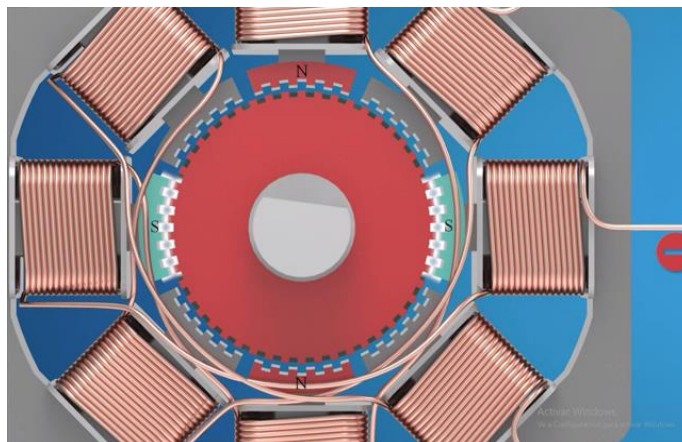


Figura 17 Interacción entre la polaridad norte del imán con la polaridad sur del estator.

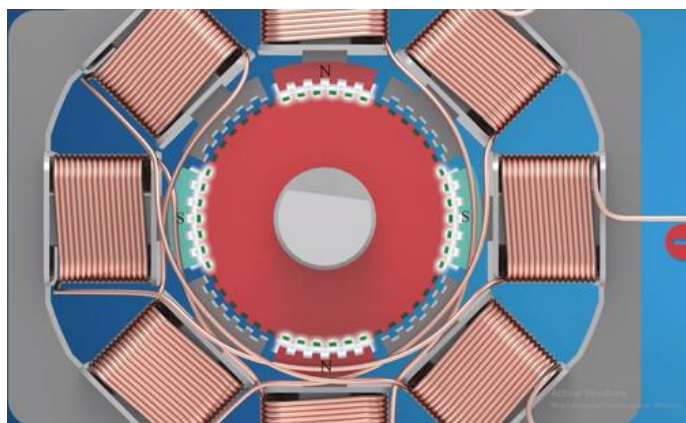


Figura 18 Interacción entre todas las polaridades.

Características del motor paso a paso híbrido:

- Ángulo de paso pequeño.
- El par suficiente aplicado al eje para superar el par de retención movería el rotor por un diente.
- El rotor es un imán permanente con dientes finos. Los dientes norte y sur están compensados por medio diente para un ángulo de escalón más pequeño.
- Los polos del estator tienen dientes finos coincidentes del mismo paso que el rotor.
- Los devanados del estator se dividen en no menos de dos fases.
- Los polos de los devanados de un estator están compensados por un cuarto de diente para un ángulo de escalón pequeño.

5.10 Motores lineales

Un motor lineal es un tipo de motor eléctrico que, en lugar de generar un movimiento rotatorio, produce un movimiento lineal, desplazando el elemento a lo largo de una trayectoria recta o curvada. A diferencia de los motores convencionales, que rotan alrededor de un eje, los motores lineales operan en una sola dimensión, lo que permite un control de movimiento más preciso y directo.

El funcionamiento de un motor lineal se basa en la fuerza de Lorentz, donde la fuerza aplicada sobre el objeto se determina por la interacción entre la corriente eléctrica y el campo magnético. En este modo, la fuerza es proporcional tanto a la intensidad de la corriente como al campo magnético generado por los imanes. Esto permite que el motor proporcione un movimiento eficiente y controlado sin la necesidad de componentes mecánicos de transmisión, como engranajes o bandas.

La figura 19 muestra un motor lineal excitado con corriente directa.

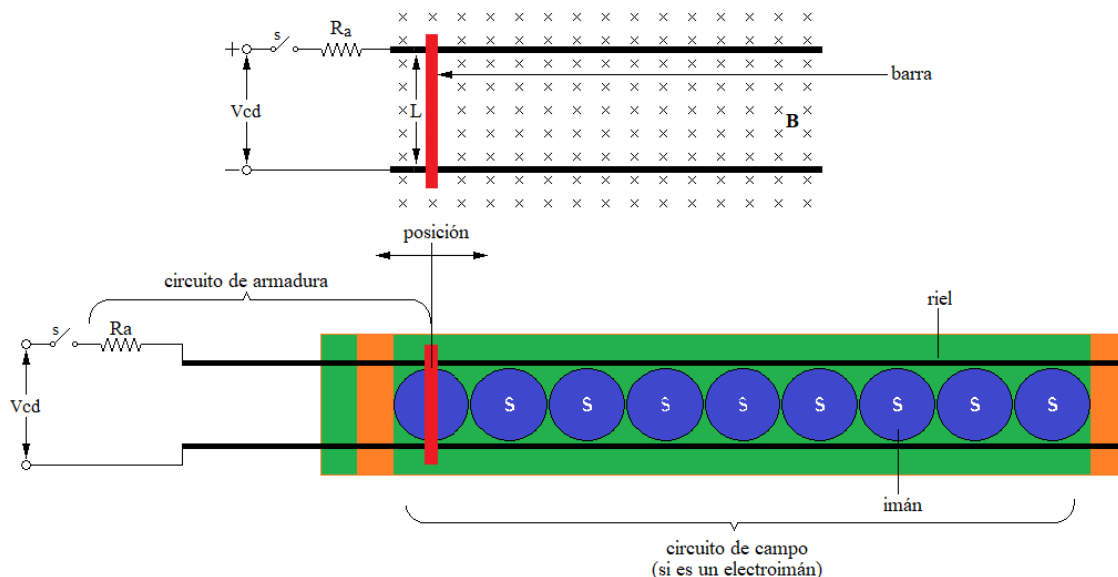


Figura 19 Motor lineal excitado con corriente directa.

El motor lineal de la figura 19 está dividido en 2 circuitos (como sucede en la máquina de corriente directa), un circuito de armadura y un circuito de campo. Si el campo magnético es producido por electroimanes el circuito inductor se conoce como circuito de campo. El circuito inducido es el circuito de armadura (circuito encargado de transformar la potencia eléctrica en potencia mecánica cuando se ponga carga en la barra).

Condición inicial (interruptor s abierto): $F = 0\text{N}$, $v = 0\text{m/s}$, $I_a = 0\text{A}$, $e_{\text{ind}} = 0\text{V}$

Donde

F fuerza ejercida sobre la barra

v velocidad de la barra

I_a corriente de armadura

e_{ind} tensión inducida (fuerza contraelectromotriz)

Escenario ideal

Momento 1. ¿Qué sucede cuando se cierra el interruptor s (figura 20)? La corriente I_a que consume la máquina cuando esta inicia con velocidad 0m/s es la corriente de arranque, definida por la ecuación 6.

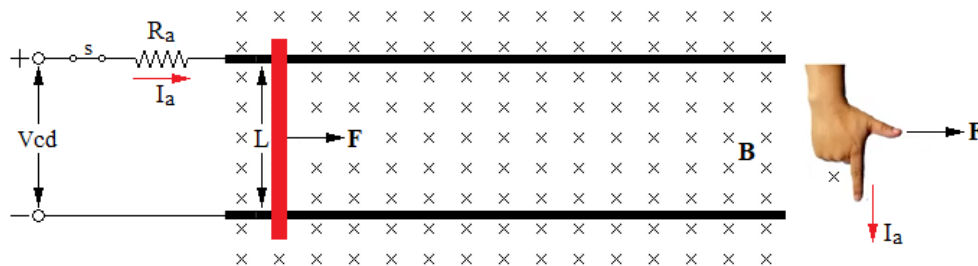


Figura 20 Momento 1. Corriente de arranque del motor lineal y fuerza ejercida sobre la barra.

$$I_a = \frac{V_{cd}}{R_a} \quad \text{"corriente de arranque"} \quad 6$$

La corriente de arranque es grande puesto que la resistencia R_a siempre es pequeña. La fuerza F que la barra experimenta está definida por la ecuación 7. Aplicando la regla de la mano derecha, la fuerza de Lorentz (fuerza magnética sobre la barra) actúa hacia la derecha.

$$\mathbf{F} = I_a (\mathbf{L} \times \mathbf{B}) \quad 7$$

$$F = I_a L B \sin \alpha$$

El ángulo α entre el vector $\mathbf{L}$ y el vector $\mathbf{B}$ es 90° por lo que la fuerza es máxima (ecuación 8).

$$F = I_a B L \quad 8$$

Momento 2. Un instante de tiempo después la barra adquiere la velocidad v y se induce tensión en el circuito e_{ind} (figura 21) ya que la barra está inmersa en el campo magnético $\mathbf{H}$.

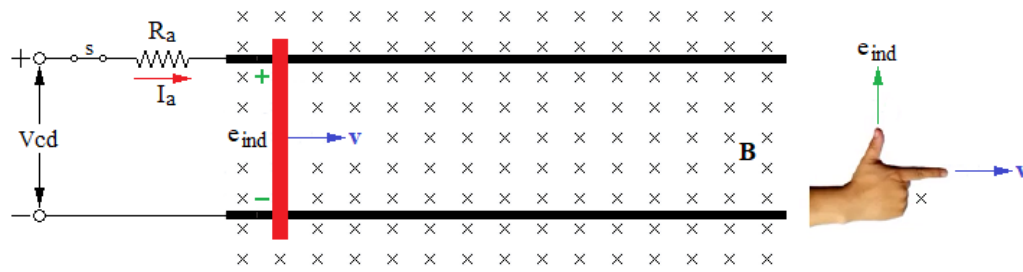


Figura 21 Momento 2. Velocidad $\mathbf{v}$ y fuerza electromotriz inducida e_{ind} .

La tensión inducida e_{ind} se calcula mediante la ecuación 9. Aplicando la regla de la mano derecha se define la polaridad de la tensión inducida e_{ind} .

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{L} = v B L \sin \alpha \cos \theta \quad 9$$

El ángulo α entre el vector $\mathbf{v}$ y el vector $\mathbf{B}$ es 90° y el ángulo θ entre el vector $(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ y el vector $\mathbf{L}$ es 0° , por lo que la tensión inducida es máxima (ecuación 10).

$$e_{ind} = v B L \quad 10$$

La barra se desplaza hacia la derecha y el circuito de armadura “ve” un campo magnético que aumenta (caso A, “Ley de Lenz”), al aplicar la regla de la mano derecha para definir la polaridad de una bobina (circuito de armadura) se verifica la polaridad de la tensión inducida en la barra. La tensión inducida (fuerza contraelectromotriz) se opone a la fuente V_{cd} .

La corriente para el **momento 2** queda definida mediante la ecuación 11. La tensión inducida e_{ind} es función de la velocidad $\mathbf{v}$, por lo que I_a descende. El motor lineal queda en una condición que se conoce como condición de vacío en donde la barra se desplaza hacia la derecha.

$$I_a = \frac{V_{cd} - e_{ind}}{R_a} \quad \text{"corriente de estado estacionario"} \quad 11$$

A partir de aquí, el proceso se repite iterativamente. Para el **momento 1**, con el nuevo valor de la corriente de armadura se recalcula la fuerza F , con el nuevo valor de la fuerza F se recalcula la velocidad $\mathbf{v}$ (**momento 2**), con el nuevo valor de la velocidad $\mathbf{v}$ se recalcula la tensión inducida e_{ind} , con el nuevo valor de la tensión inducida e_{ind} se recalcula el nuevo valor de la corriente de armadura I_a . Así, de esta manera, el motor lineal logra un estado estacionario en donde la barra continua desplazándose.

En estado estacionario:

- La corriente I_a inicia en su máximo y en estado estacionario es 0A.
- La fuerza F inicia en su máximo y en estado estacionario es 0N.
- La velocidad $\mathbf{v}$ de la barra inicia en 0m/s y en estado estacionario llega a su límite.
- La tensión inducida e_{ind} inicia en 0V y en estado estacionario es V_{cd} .

La velocidad de estado estacionario v_{ss} se calcula usando la ecuación 12. La ecuación 12 es válida sin importar la condición de carga que tenga la barra.

$$v_{ss} = \frac{e_{ind}}{BL} \tag{12}$$

Es importante observar que en el **momento 1** la fuerza F es máxima y la velocidad **v** se calcula usando la ecuación **13**.

$$v = \frac{V_{cd}}{BL} \tag{13}$$

Para analizar cómo se comportan las variables eléctricas y mecánicas en el tiempo, suponga que $V_{cd} = 120V$, $R_a = 0.5\Omega$, $B = 2T$, $F_r = 0N$ (fuerza por fricción) y $F_L = 0N$ (fuerza ejercida por la carga). Las condiciones iniciales son $F = 0N$, $v = 0m/s$, $I_a = 0A$ y $e_{ind} = 0V$. La corriente a través de la armadura I_a y tensión inducida en la barra e_{ind} se muestran en la figura **22**. La fuerza ejercida en la barra F y la velocidad con la que la barra se desplaza **v** se muestran en la figura **23**.

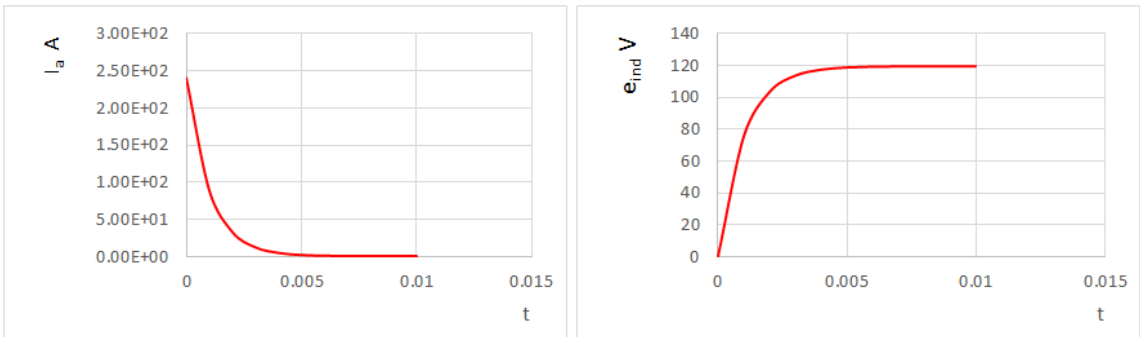


Figura **22** Corriente a través de la armadura I_a y tensión inducida en la barra e_{ind} .
Escenario ideal.

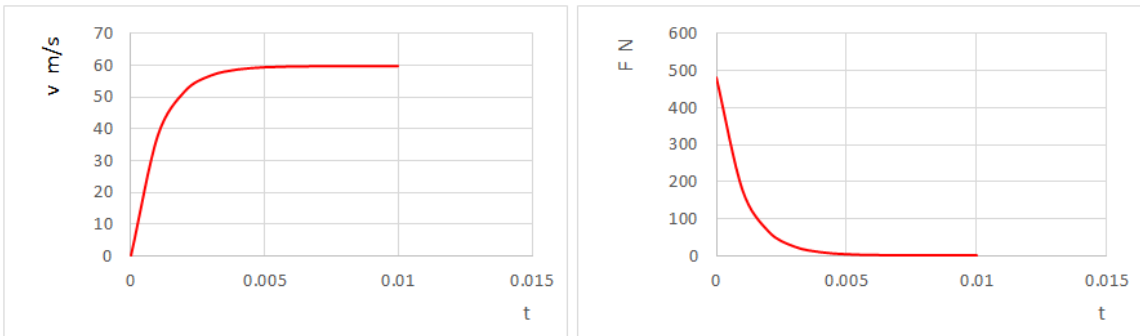


Figura **23** Fuerza ejercida en la barra F y velocidad con la que la barra se desplaza **v**.
Escenario ideal.

Resumen:

Corriente de arranque	Corriente de estado estacionario
A	A
240	0
Tensión inducida inicial	Tensión inducida final
V	V
0	120

Velocidad inicial	Velocidad final
m/s	m/s
0	60
Fuerza inicial	Fuerza final
N	N
480	0

Escenario real (motor lineal en vacío)

Las pérdidas mecánicas (fricción entre la barra y los rieles) se consideran tomando en cuenta la fuerza ejercida sobre la barra F_r (fuerza de rozamiento) debida a la corriente inducida i_{ind} (figura 24).

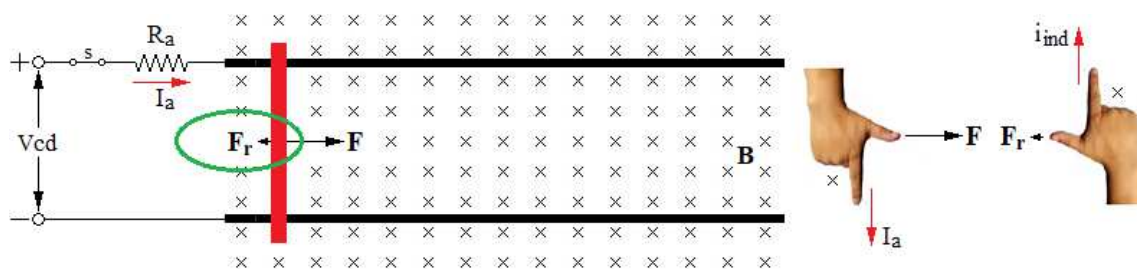


Figura 24 Tomando en cuenta las pérdidas mecánicas.

El funcionamiento es equivalente al análisis real; es decir, se presenta el **momento 1** y posteriormente el **momento 2**.

En estado estacionario:

- La corriente I_a inicia en su máximo y en estado estacionario tiende a un valor pequeño.
- La fuerza F inicia en su máximo y en estado estacionario tiende a F_r .
- La velocidad v de la barra inicia en 0m/s y en estado estacionario llega a su límite definida por la ecuación 12.
- La tensión inducida e_{ind} inicia en 0V y en estado estacionario tiende a un valor cercano de V_{cd} .

Las pérdidas mecánicas aumentan la corriente de armadura, disminuyen la tensión inducida (no llega a V_{cd}) y disminuyen la velocidad.

Para analizar cómo se comportan las variables eléctricas y mecánicas en el tiempo, suponga que $V_{cd} = 120\text{V}$, $R_a = 0.5\Omega$, $B = 2\text{T}$, $F_r = 20\text{N}$ (fuerza por fricción) y $F_L = 0\text{N}$ (fuerza ejercida por la carga). Las condiciones iniciales son $F = 0\text{N}$, $v = 0\text{m/s}$, $I_a = 0\text{A}$ y $e_{ind} = 0\text{V}$. La corriente a través de la armadura I_a y tensión inducida en la barra e_{ind} se muestran en la figura 25. La fuerza ejercida en la barra F y la velocidad con la que la barra se desplaza v se muestran en la figura 26.

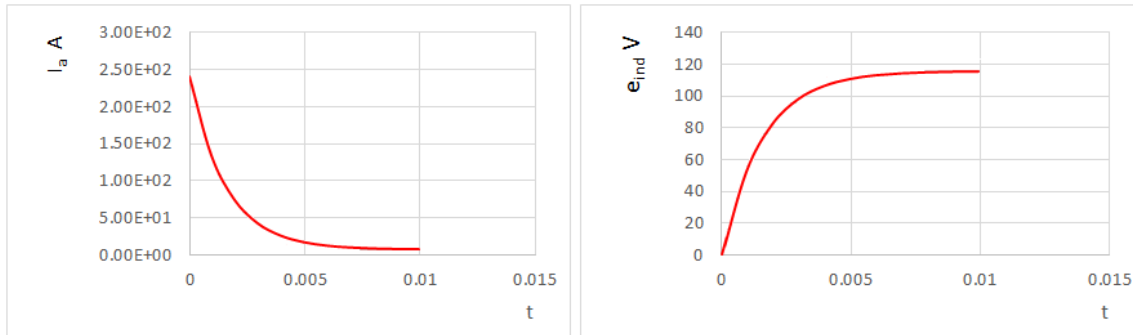


Figura 25 Corriente a través de la armadura I_a y tensión inducida en la barra e_{ind} .
Escenario real (motor lineal en vacío).

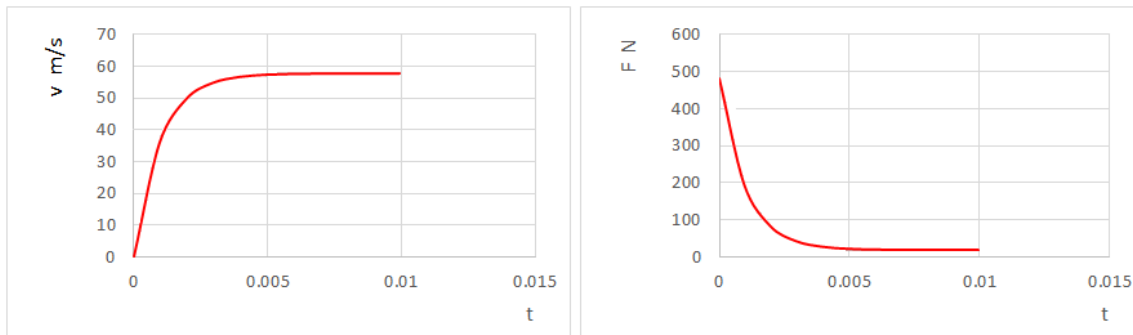


Figura 26 Fuerza ejercida en la barra F y velocidad con la que la barra se desplaza v .
Escenario real (motor lineal en vacío).

En estado estacionario, la potencia eléctrica es:

$$P_{entrada} = P_{eléctrica} = V_{cd} I_a = (120) (10) = 1200W$$

Las pérdidas eléctricas son:

$$P_{Ra} = I_a^2 R_a = (10)^2 (0.5) = 50W$$

La potencia en la barra es la potencia convertida, esta potencia es la potencia eléctrica que efectivamente se convierte en potencia mecánica.

$$P_{barra} = P_{convertida} = P_{mecánica} = P_{in} - P_{Ra} = e_{ind} * I_a = 1150W$$

La pérdida rotacional es la potencia convertida ($P_{rotacional} = P_{convertida}$). Por lo tanto la potencia de salida se define mediante la ecuación 14.

$$P_{salida} = P_{entrada} - P_{Ra} - P_{rotacional} \quad 14$$

Sabemos que el motor está en vacío, por lo tanto:

$$P_{salida} = 1200 - 50 - 1150 = 0W$$

Resumen:

Corriente de arranque	Corriente de estado estacionario
A	A
240	10
Tensión inducida inicial	Tensión inducida final
V	V
0	115
Velocidad inicial	Velocidad final
m/s	m/s
0	57.5
Fuerza inicial	Fuerza final
N	N
480	20
$P_{\text{entrada}} = P_{\text{eléctrica}}$	P_{R_a}
W	W
1200	50
$P_{\text{convertida}}$	$P_{\text{rotacional}}$
W	W
1150	1150
	P_{salida}
	W
	0

Algunos aspectos importantes

El motor lineal y cualquier motor en un escenario real tiene pérdidas rotacionales.

Las pérdidas rotacionales generan un aumento en la corriente de armadura I_a cuando el motor está en vacío.

Es posible determinar las pérdidas rotacionales del motor midiendo la potencia del motor en vacío.

Escenario real (motor lineal con carga)

Ahora la barra tiene un peso y debe mover la carga. La figura 27 muestra la acción de la fuerza ejercida por la carga F_L .

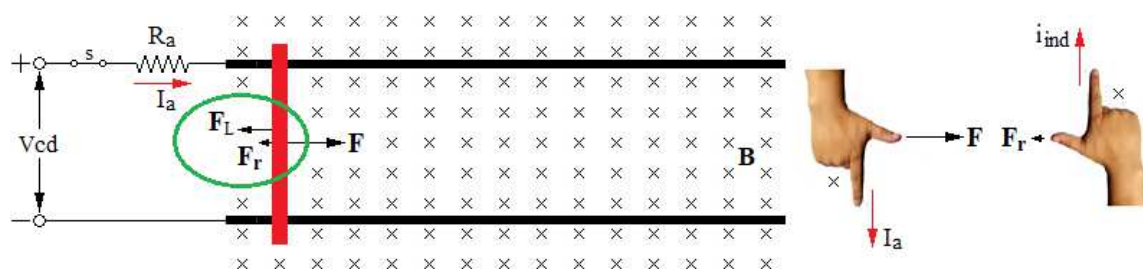


Figura 27 Tomando en cuenta las pérdidas mecánicas y la potencia que la barra requiere para mover la carga.

El funcionamiento es equivalente al análisis real; es decir, se presenta el **momento 1** y posteriormente el **momento 2**.

En estado estacionario:

- La corriente I_a inicia en su máximo y en estado estacionario tiende al valor I_a .
- La fuerza F inicia en su máximo y en estado estacionario tiende a $(F_r + F_L)$.
- La velocidad v de la barra inicia en 0m/s y en estado estacionario llega a su límite definida por la ecuación 12.
- La tensión inducida e_{ind} inicia en 0V y en estado estacionario tiende a V_{cd} .

Las pérdidas mecánicas y la potencia que la barra requiere para mover la carga aumentan la corriente de armadura, disminuyen la tensión inducida y disminuyen la velocidad.

Para analizar cómo se comportan las variables eléctricas y mecánicas en el tiempo, suponga que $V_{\text{cd}} = 120\text{V}$, $R_a = 0.5\Omega$, $B = 2\text{T}$, $F_r = 20\text{N}$ (fuerza por fricción) y $F_L = 100\text{N}$ (fuerza ejercida por la carga). Las condiciones iniciales son $F = 0\text{N}$, $v = 0\text{m/s}$, $I_a = 0\text{A}$ y $e_{\text{ind}} = 0\text{V}$. La corriente a través de la armadura I_a y tensión inducida en la barra e_{ind} se muestran en la figura 28. La fuerza ejercida en la barra F y la velocidad con la que la barra se desplaza v se muestran en la figura 29.

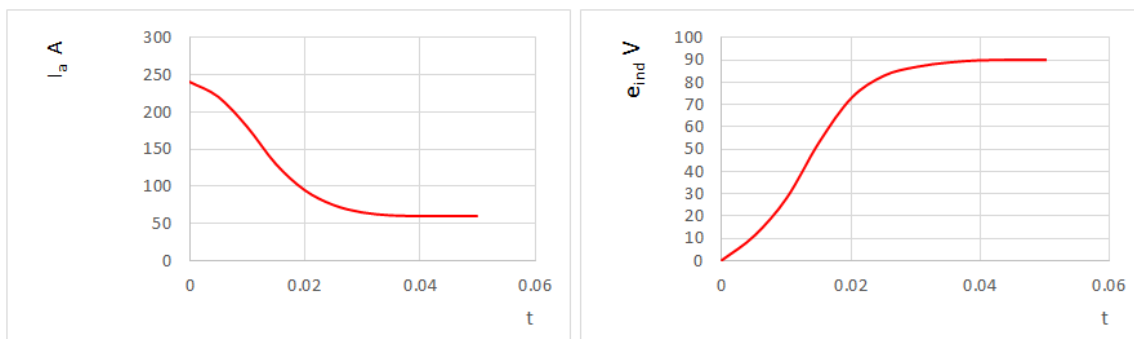


Figura 28 Corriente a través de la armadura I_a y tensión inducida en la barra e_{ind} .
Escenario real (motor lineal con carga).

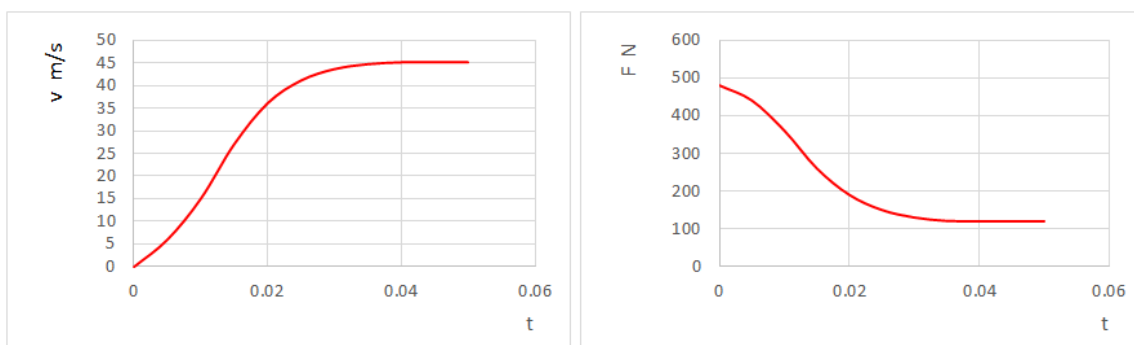


Figura 29 Fuerza ejercida en la barra F y velocidad con la que la barra se desplaza v .
Escenario real (motor lineal con carga).

En estado estacionario, la potencia eléctrica es:

$$P_{\text{entrada}} = P_{\text{eléctrica}} = V_{\text{cd}} I_a = (120) (60) = 7200\text{W}$$

Las pérdidas eléctricas son:

$$P_{Ra} = I_a^2 R_a = (60)^2 (0.5) = 1800W$$

La potencia en la barra es la potencia convertida, esta potencia es la potencia eléctrica que efectivamente se convierte en potencia mecánica.

$$P_{barra} = P_{convertida} = P_{mecánica} = P_{in} - P_{Ra} = e_{ind} * I_a = 5400W$$

La pérdida rotacional se extrae de la condición de vacío, $P_{rotacional} = 1150W$. Por lo tanto la potencia de salida se define mediante la ecuación 14.

$$P_{salida} = P_{entrada} - P_{Ra} - P_{rotacional} \quad 14$$

Sabemos que el motor está en vacío, por lo tanto:

$$P_{salida} = 7200 - 1800 - 1150 = 4250W$$

Resumen:

Corriente de arranque	Corriente de estado estacionario
A	A
240	60
Tensión inducida inicial	Tensión inducida final
V	V
0	90
Velocidad inicial	Velocidad final
m/s	m/s
0	45
Fuerza inicial	Fuerza final
N	N
480	120
$P_{entrada} = P_{eléctrica}$	P_{Ra}
W	W
7200	1800
$P_{convertida}$	$P_{rotacional}$
W	W
5400	1150
	P_{salida}
	W
	4250

Algunos aspectos importantes

En estado estacionario $F = F_r + F_L$.

La fuerza “F” y la suma de las fuerzas “ $F_r + F_L$ ” son iguales en magnitud, son colineales y actúan en direcciones opuestas.

Puesto que son iguales y contrarias la fuerza total es 0N, la barra no experimenta aceleración e ira a una velocidad constante de 45m/s.

Se requieren 4250W para que la barra desplace una carga de 100N. En R_a se disipan 1800W y las $P_{rotacionales}$ son 1150W. En total la fuente de alimentación debe suministrar 7200W.

Un aspecto importante a considerar es la eficiencia del motor lineal, definida por la ecuación 15.

$$\eta = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}} 100 \quad 15$$

La eficiencia η del motor lineal para mover una carga de 100N es 59%.

El experimento se puede llevar a cabo muchas veces considerando diferentes valores de F_L . Lo anterior permite caracterizar al motor lineal graficando la curva v vs F_L . La figura 30 muestra la característica v vs F_L para el motor lineal analizado.

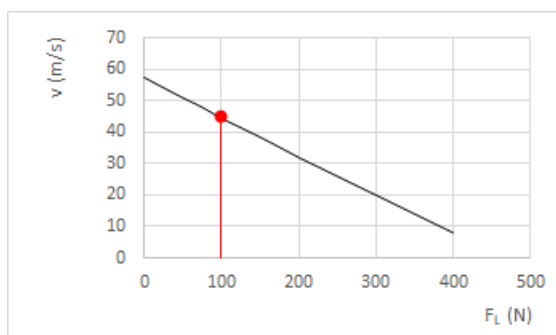


Figura 30 Característica v vs F_L para el motor lineal excitado con corriente directa analizado.

A medida que la carga se incrementa la velocidad disminuye. El punto sobre la curva indica que para $F_L = 100\text{N}$, la velocidad de la barra v es 45m/s. Si la carga se incrementa más allá de 450N el motor lineal para. Por lo tanto, la curva sirve para saber cuánta carga se puede aplicar al motor lineal.

Observación. Los motores eléctricos rotativos se caracterizan mediante la curva v vs τ . Donde τ es el par mecánico que el motor desarrolla.

La figura 31 muestra un motor lineal excitado con corriente directa, solo cuenta con un imán.

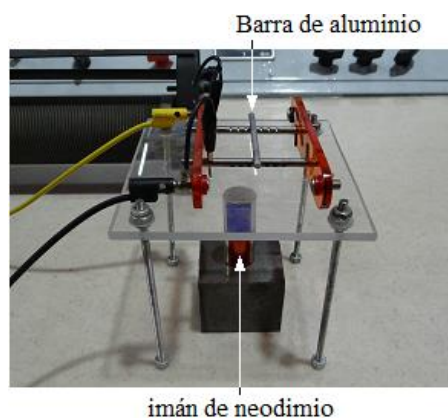


Figura 31 Motor lineal excitado con corriente directa.

De lo anterior, la base del funcionamiento de los motores lineales se basa en las mismas leyes de electromagnetismo que rigen los motores rotativos, pero con una configuración distinta. Un motor lineal consta de dos componentes principales:

- Estator: La parte estacionaria del motor. Generalmente, contiene bobinas de alambre que generan un campo magnético cuando se aplica una corriente eléctrica.
- Rotor: La parte móvil del motor. Puede ser un conductor de metal, una serie de imanes o un conjunto de bobinas, que interactúa con el campo magnético del estator para producir movimiento.

Cuando se aplica corriente eléctrica a las bobinas del estator, se genera un campo magnético que interactúa con el rotor. Esta interacción genera una fuerza que empuja o atrae el rotor, creando movimiento lineal. El movimiento es continuo mientras se aplica corriente eléctrica.

Tipos de motores lineales:

Motores Lineales de Inducción (LIM). Los LIM (figura 32) son similares a los motores de inducción rotativos, pero con una construcción lineal. Funcionan por inducción electromagnética. El estator, con sus bobinas, genera un campo magnético que induce corrientes en el rotor (generalmente una placa de metal conductor). Estas corrientes inducidas generan un campo magnético opuesto, produciendo la fuerza que mueve el rotor.

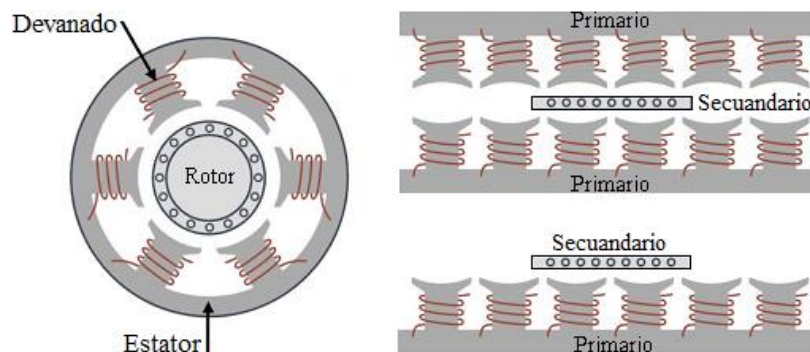


Figura 32
Motores
lineales de
inducción.

Motores Lineales Síncronos (LSM). Los LSM (figura 33) utilizan imanes permanentes en el rotor. El campo magnético del estator (matriz de imanes de Halbach) interactúa con los imanes del rotor, generando una fuerza que impulsa el rotor en una dirección lineal. Los LSM se caracterizan por su alta eficiencia y precisión, bajo mantenimiento y escalabilidad. Son más caros que los LIM. Los LSM generan movimiento lineal usando electromagnetismo sin conversión mecánica.

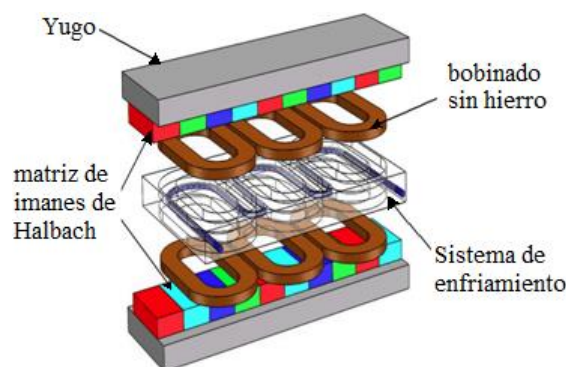


Figura 33 Motor lineal
síncrono.

Motores Lineales de Imán Permanente (PM). Los PM (figura 34) utilizan imanes permanentes en el rotor y bobinas en el estator. Se basan en la interacción entre el campo magnético del estator y los imanes del rotor. Los motores PM son conocidos por su alta densidad de potencia y eficiencia, pero pueden ser más sensibles a los cambios de temperatura.



Figura 34 Motor lineal de imán permanente.

5.11 Aplicación de los motores especiales

El **motor con condensador de arranque** se utiliza en aires acondicionados, compresores de refrigeradores, bombas de agua, motores de lavadoras, sierras circulares, etc.

Ventajas:

- Fácil de operar y no requieren un sistema de control complejo.
- Son robustos y pueden soportar condiciones de trabajo adversas.
- A igual potencia, es menos ruidoso que el motor monofásico de fase hendida.
- A igual potencia, el par de arranque es más alto y la corriente de arranque es más pequeña en comparación con el motor monofásico de fase hendida.

Desventajas:

- A igual potencia, el motor monofásico es más voluminoso que el motor trifásico.
- A igual potencia, en el monofásico la eficiencia y factor de potencia son inferiores que en el motor trifásico.

El **motor con condensador de marcha** se utiliza en máquinas de coser industriales, bordadoras, etc., donde se requiere un arranque suave.

Ventajas:

- Fácil de operar y no requieren un sistema de control complejo.
- A igual potencia, es menos ruidoso que el motor con condensador de arranque.
- A igual potencia, el par de arranque es más bajo en comparación con el motor monofásico de fase hendida.
- A igual potencia, el factor de potencia es más alto en comparación con el motor con condensador de arranque.

Desventajas:

- Tienen un par de arranque bajo. El motor debe arrancar en vacío y posteriormente se aplica carga.

El **motor universal de CA/CD** se utiliza en herramientas portátiles tales como taladros, sierras, pulidoras eléctricas, etc., y en aparatos caseros tales como aspiradoras, batidoras, licuadoras, máquinas de coser en los que la alta velocidad, mucha potencia y tamaño pequeño constituyen una ventaja. A igual potencia, el motor universal es más eficiente en corriente directa que en corriente alterna. A igual potencia, el par de arranque del motor excitado con corriente alterna es mucho menor que el motor excitado con corriente directa. A igual potencia, la corriente de arranque del motor excitado con corriente alterna es menor que la corriente de arranque del motor excitado con corriente directa.

Ventajas:

- Ofrecen un alto par de arranque, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren una potencia inicial alta.
- La capacidad de velocidad variable es una ventaja significativa, ya que la velocidad disminuye con el aumento de la carga, permitiendo un control eficiente.
- Su construcción es relativamente simple y económica, lo que contribuye a su popularidad en diversas aplicaciones.

Desventajas:

- El conmutador y las escobillas están en contacto constante, lo que provoca desgaste y requiere mantenimiento regular.
- A igual potencia, es más ruidoso que el motor monofásico de fase hendidada.
- La eficiencia es menor en comparación con otros tipos de motores eléctricos debido a las pérdidas de energía en el conmutador.

El **motor de polos sombreados** se utiliza en pequeños ventiladores de piso y de techo, bombas de agua pequeñas, relojes eléctricos, secadoras de pelo, juguetes, etc.

Ventajas:

- Son relativamente económicos de fabricar debido a su diseño simple.
- Fácil de operar y no requieren un sistema de control complejo.
- Son robustos y pueden soportar condiciones de trabajo adversas.

Desventajas:

- Son motores pequeños de caballaje fraccionario, por lo general sus capacidades se encuentran debajo de 40W (0.05Hp).
- Tienen una eficiencia baja, menor que otros tipos de motores de inducción.
- La velocidad es relativamente fija y no se puede controlar fácilmente.
- El par de arranque es pequeño.

El **motor paso a paso** se utiliza en una amplia gama de aplicaciones industriales y comerciales, debido a su precisión, confiabilidad y flexibilidad. Algunas de sus aplicaciones más comunes incluyen:

Automatización Industrial

- Se utilizan en robots industriales para controlar el movimiento de brazos, pinzas y otros componentes.
- Se utilizan en maquinaria de empaquetado para controlar la precisión del empaquetado de productos, asegurando la calidad y la eficiencia del proceso.

- Se utilizan en impresoras de gran formato y dispositivos de corte para controlar el movimiento preciso de los cabezales de impresión.
- Se utilizan en sistemas de control numérico (CNC) para controlar el movimiento de las herramientas de corte y la precisión del mecanizado.

Robótica

- Se utilizan en robots móviles para controlar el movimiento de las ruedas y la dirección.
- Se utilizan en robots de servicio para controlar el movimiento de los brazos, las pinzas y otros componentes.
- Se utilizan en robots de exploración para controlar el movimiento de las ruedas y la dirección, así como para controlar los sensores y las cámaras.

Impresión 3D

- Se utilizan en impresoras 3D para controlar el movimiento de los cabezales de impresión y la precisión de la impresión.
- Se utilizan en escáneres 3D para controlar el movimiento de los sensores y la precisión del escaneo.

Otros campos

- Se utilizan en dispositivos médicos para controlar el movimiento preciso de las piezas mecánicas, como en los equipos de diálisis y los equipos de rehabilitación.
- Se utilizan en instrumentos musicales electrónicos para controlar el movimiento de las cuerdas, los tambores y otros componentes.
- Se utilizan en sistemas de seguridad para controlar el movimiento de las puertas, las ventanas y otros dispositivos de seguridad

Ventajas:

- Control de posición preciso, la capacidad de moverse en pasos discretos permite un control preciso de la posición del eje de salida.
- Pueden alcanzar una alta resolución, lo que se traduce en movimientos suaves y precisos.
- Ofrecen un par de arranque elevado, lo que les permite mover cargas pesadas.
- Operación silenciosa, lo que los hace ideales para aplicaciones donde se requiere un bajo nivel de ruido.
- No requieren un mantenimiento complejo, ya que no tienen escobillas ni piezas móviles que se desgasten.
- Su funcionamiento se basa en un control digitales, lo que facilita su integración en sistemas de control automatizados.

Desventajas:

- Su velocidad de funcionamiento está limitada por la frecuencia de energización de las bobinas. A velocidades muy altas, el motor puede perder pasos y generar vibraciones.
- Los motores paso a paso pueden resonar a ciertas velocidades, lo que puede generar vibraciones y ruido.
- Si se operan a altas velocidades o con cargas pesadas, los motores paso a paso pueden calentarse.

- En comparación con otros tipos de motores, los motores paso a paso pueden ser más costosos

El **motor lineal** se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde sistemas de transporte hasta maquinaria industrial. Algunas de las aplicaciones más notables incluyen:

Transporte

- El tren magnético Maglev (tren de levitación magnética) utiliza motores lineales para la propulsión y la levitación. Eliminan la fricción de las ruedas sobre los rieles, lo que permite alcanzar velocidades extremadamente altas.
- Se utilizan en sistemas de transporte público automatizados como los trenes subterráneos, los tranvías y los sistemas de movimiento de personas en aeropuertos.

Industria

- Se utilizan en maquinaria de precisión como máquinas de CNC, máquinas de corte por láser y máquinas de grabado. Proporcionan un movimiento preciso y controlado para la fabricación de piezas con tolerancias muy estrechas.
- Los robots industriales utilizan motores lineales para el movimiento de sus brazos y manos, lo que les permite realizar tareas complejas de manera eficiente.
- Se utilizan en sistemas de manipulación de materiales, como cintas transportadoras, elevadores y sistemas de almacenamiento y recuperación.
- Se utilizan en impresoras 3D para controlar el movimiento preciso del cabezal de impresión.

Otras aplicaciones

- Se utilizan en equipos médicos como escáneres de resonancia magnética (MRI) y tomografías computarizadas (CT), para el movimiento preciso de las mesas de examen.
- Se utilizan en dispositivos de actuación en una variedad de aplicaciones, como válvulas, compuertas y sistemas de control de flujo.

Ventajas

- Generan movimiento lineal directamente, sin necesidad de mecanismos adicionales como engranajes o bandas.
- Pueden lograr una alta precisión y un movimiento suave, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren un posicionamiento preciso.
- Pueden alcanzar velocidades muy altas, lo que los hace adecuados para aplicaciones de alta velocidad.
- Tienen menos piezas móviles que los motores rotativos, lo que reduce los requisitos de mantenimiento.

Desventajas

- Suelen ser más caros que los motores rotativos.
- Pueden ser voluminosos, especialmente para recorridos largos.
- El control de los motores lineales puede ser más complejo que el de los motores rotativos.

Complementos educativos

Tema 5

Aprendizaje basado en problemas

Referencia:

Diseño del complemento:

Problemas 1 y 2

“Tema 5” de la asignatura **“Máquinas Eléctricas”**

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Problema 1 Análisis del devanado desplegado del motor de inducción monofásico con condensador de arranque

Considere la figura i para analizar la propuesta del devanado desplegado del motor de inducción con condensador de arranque. Es necesario suponer una convención. Considere el instante t_1 de la figura i, la corriente instantánea $i_a(t)$ es positiva y la corriente $i_p(t)$ es negativa lo que supondría que la corriente $i_a(t)$ entrara al devanado auxiliar y que la corriente $i_p(t)$ saliera del devanado principal (puede suponerse lo contrario, los resultados son los mismos).

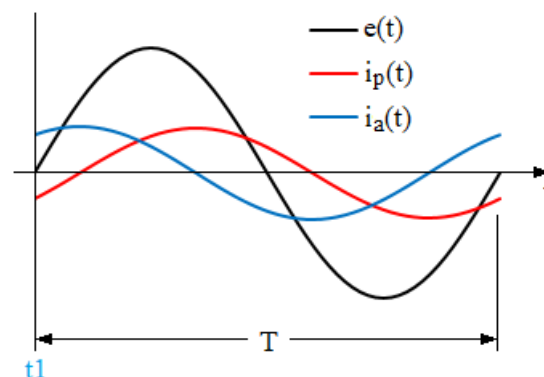
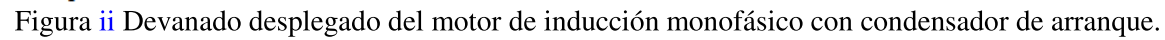
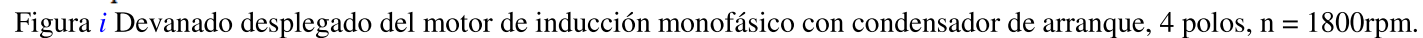


Figura i Gráfico en función del tiempo. Tensión de alimentación $e(t)$, corriente por el devanado principal $i_p(t)$ y corriente por el devanado auxiliar $i_a(t)$.

Problema a Tomando en cuenta la convención anterior indique en la figura ii las corrientes $i_a(t)$ e $i_p(t)$ utilizando flechas en los devanados, utilice la regla de la mano derecha para definir la polaridad de los grupos de bobinas e indique N o S en el centro del grupo de bobinas considerado, analice que campos magnéticos tendrían que interactuar, defina el número de polos de la máquina y defina la velocidad sincrónica en rpm (velocidad del campo magnético giratorio).



La figura *i* muestra los resultados para la conexión analizada.



Solución:

La figura *ii* muestra los resultados para la conexión analizada.

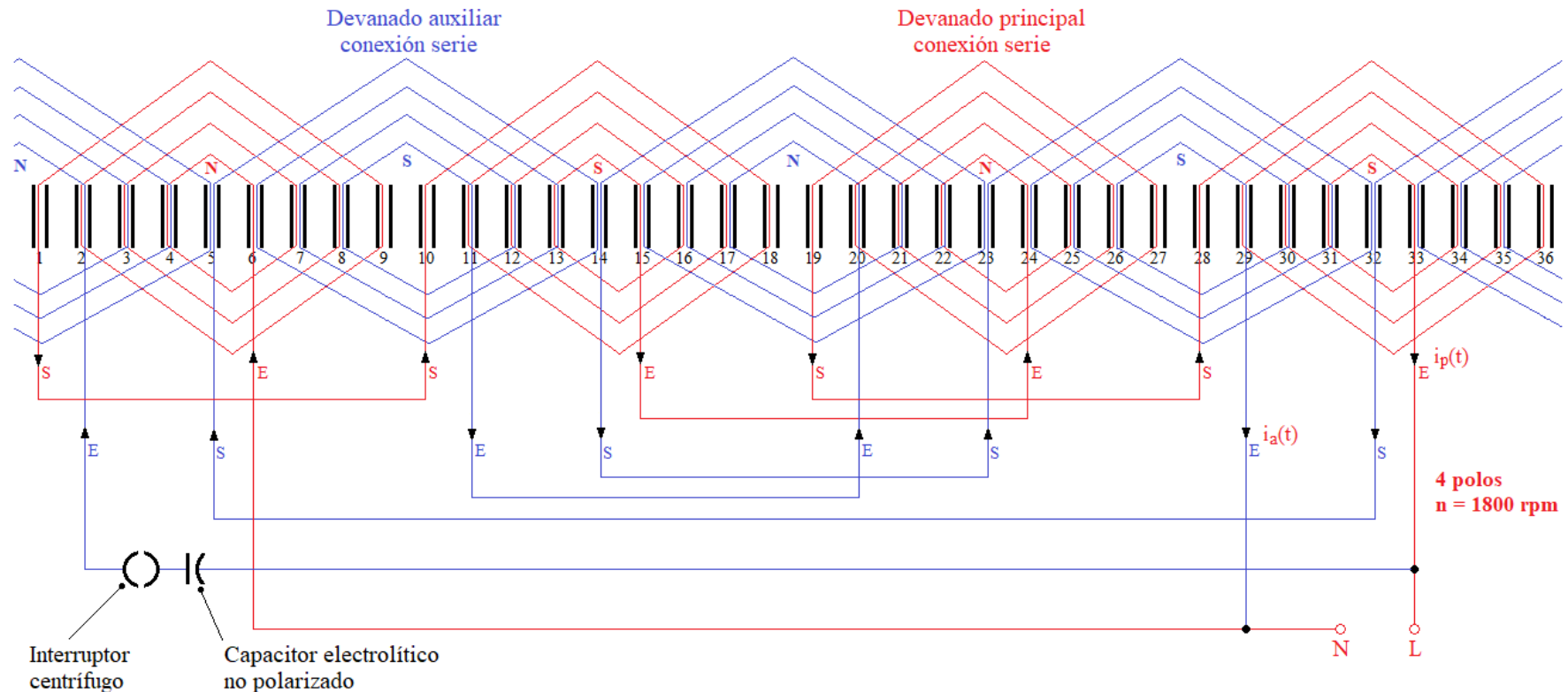


Figura *ii* Inversión del sentido de rotación (campo magnético giratorio en sentido opuesto). Devanado desplegado del motor de inducción monofásico con condensador de arranque, 4 polos, $n = 1800$ rpm.

Si se invierten las conexiones del devanado de arranque, la corriente por el devanado auxiliar cambia de dirección creando un campo magnético giratorio en sentido opuesto.

Problema 2 Análisis del funcionamiento del motor de pasos

Problema a La figura 11 muestra la forma de onda para el motor paso a paso de reluctancia variable de 4 fases (8/6 polos) para una secuencia fase₁-fase₂-fase₃-fase₄-fase₁. Muestre la forma de onda para la secuencia fase₁-fase₄-fase₃-fase₂-fase₁.

Solución:

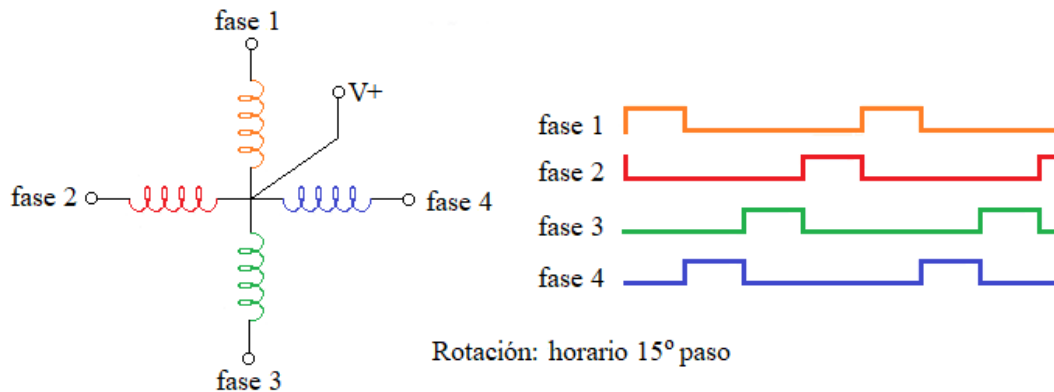


Figura iii Forma de onda para el motor paso a paso de reluctancia variable de 4 fases (8/6 polos) para una secuencia fase₁-fase₄-fase₃-fase₂-fase₁.

Problema b La figura iii muestra un motor paso a paso de reluctancia variable de 3 fases (6/4 polos).

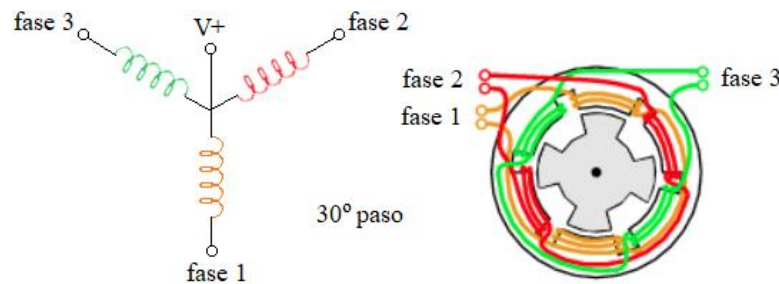


Figura iii Motor paso a paso de reluctancia variable de 3 fases (6/4 polos).

1 Calcule α_s y α_r .

2 Muestre la forma de onda para la secuencia fase₁-fase₂-fase₃-fase₁.

3 Si $\alpha = 30^\circ$ ¿Cómo definiría N_s y N_r ?

Solución:

1

$$\alpha_s = 60^\circ$$

$$\alpha_r = 90^\circ$$

2



Figura iv Forma de onda para el motor paso a paso de reluctancia variable de 3 fases (6/4 polos) para una secuencia fase₁-fase₂-fase₃-fase₁. Rotación: antihorario 30° paso.

3 Conocido el valor de α , puede suponerse N_r y calcular N_s . Usando la ecuación 5 se tiene:

$$\begin{aligned}\alpha(N_s N_r) &= (N_s - N_r)360^\circ \\ \frac{\alpha(N_r)}{360^\circ} &= \frac{N_s - N_r}{N_s} = 1 - \frac{N_r}{N_s} \\ -1 + \frac{\alpha(N_r)}{360^\circ} &= \frac{N_s - N_r}{N_s} = -\frac{N_r}{N_s} \\ N_s &= \frac{-N_r}{-1 + \frac{\alpha N_r}{360^\circ}}\end{aligned}$$

Por lo tanto, si

$$N_r = 2 \rightarrow N_s = 2.4 \quad \text{X}$$

$$N_r = 4 \rightarrow N_s = 6 \quad \checkmark$$

Observación. Otras posibilidades para que el motor sea de 3 fases y un ángulo de paso de 30° son:

$$\begin{aligned}N_r &= 6 \rightarrow N_s = 12 \\ &4 \text{ bobinas en serie} \\ &3 \text{ fases (12/6 polos)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}N_r &= 8 \rightarrow N_s = 24 \\ &8 \text{ bobinas en serie} \\ &3 \text{ fases (24/8 polos)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}N_r &= 10 \rightarrow N_s = 60 \\ &20 \text{ bobinas en serie} \\ &3 \text{ fases (60/10 polos)}\end{aligned}$$

Aprendizaje basado en retos

Referencia:

Diseño del complemento:

Reto 1, 2 y 3

“Tema 5” de la asignatura **“Máquinas Eléctricas”**

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Cualquier herramienta computacional se diseña en términos de un modelo matemático. La frase “construcción de la herramienta computacional” se refiere que el profesor debe proponer el modelo matemático en análisis y posteriormente el estudiante construye la herramienta computacional, obviamente el profesor revisa y corrige (si hubiera errores) el trabajo del estudiante hasta que concreta lo que el profesor ha definido como final.

Reto 1 Construcción de la herramienta computacional “determinación del dato de placa del motor con condensador arranque y características electromecánicas”

Esta herramienta computacional permite determinar el dato de placa de un motor con condensador de arranque y sus características electromecánicas y para su diseño se utilizó el motor de inducción del sistema electromecánico Lab-Volt MS8251 mostrado en la figura [iv](#).



Figura [iv](#) Motor con condensador de arranque del sistema electromecánico Lab-Volt EMS8251.

El diseño de la herramienta computacional se muestra en las tablas [1](#) y [2](#). La tabla [1](#) muestra los valores que deben medirse y la tabla [2](#) muestra los valores calculados usando los valores de la tabla [1](#).

Tabla 1 Valores medidos. Operación del motor con condensador de arranque.

E	Medición	τ_m	I	P	Q	n
V		lb _r ·plg	A	W	var	rpm
120	1	0				
	2	3				
	3	6				
	4	9				
	5	12				

Tabla 2 Valores calculados. Operación del motor con condensador de arranque.

τ_m	S	fp	P _m	η	R _{motor}	X _{motor}
lb _r ·plg	VA		W	%	Ω	Ω
0						
3						
6						
9						
12						

El dato de placa se determina considerando el valor más alto de la eficiencia “ η ”. El dato de placa propuesto se muestra en la tabla 3.

Tabla 3 Dato de placa propuesto. Motor con condensador de arranque.

E	I	P _m	f	n	fases
V	A	W	Hz	rpm	
					1

	valor medido
	valor propuesto
	valor calculado
	el dato se pasa de la misma hoja

Finalmente, se grafican la característica mecánica n vs τ_m , y las características electromecánicas fp vs P_m , η vs P_m , I_L vs P_m y n vs P .

Reto 2 Construcción de la herramienta computacional “determinación del dato de placa del motor de inducción monofásico con condensador de marcha y características electromecánicas”

Esta herramienta computacional permite determinar el dato de placa de un motor con condensador de marcha y sus características electromecánicas y para su diseño se utilizó el motor de inducción del sistema electromecánico Lab-Volt MS8253 mostrado en la figura v.



Figura v Motor con condensador de marcha del sistema electromecánico Lab-Volt EMS8253.

El diseño de la herramienta computacional se muestra en las tablas 4 y 5. La tabla 4 muestra los valores que deben medirse y la tabla 5 muestra los valores calculados usando los valores de la tabla 4.

Tabla 4 Valores medidos. Operación del motor con condensador de marcha.

E	Medición	τ_m	I	P	Q	n
V		lb _r plg	A	W	var	rpm
120	1	0				
	2	3				
	3	6				
	4	9				
	5	12				

Tabla 5 Valores calculados. Operación del motor con condensador de marcha.

τ_m	S	fp	P_m	η	R_{motor}	X_{motor}
lb _r plg	VA		W	%	Ω	Ω
0						
3						
6						
9						
12						

El dato de placa se determina considerando el valor más alto de la eficiencia “ η ”. El dato de placa propuesto se muestra en la tabla 6.

Tabla 6 Dato de placa propuesto. Motor con condensador de marcha.

E	I	P_m	f	n	fases
V	A	W	Hz	rpm	
					1

	valor medido
	valor propuesto
	valor calculado
	el dato se pasa de la misma hoja

Finalmente, se grafican la característica mecánica n vs τ_m , y las características electromecánicas fp vs P_m , η vs P_m , I_L vs P_m y n vs P .

Reto 3 Construcción de la herramienta computacional “determinación del dato de placa del motor universal y características electromecánicas”

Esta herramienta computacional permite determinar el dato de placa de un motor universal excitado con corriente alterna y excitado con corriente directa y sus características electromecánicas y para su diseño se utilizó el motor de inducción del sistema electromecánico Lab-Volt MS8254 mostrado en la figura vi.



Figura vi Motor universal del sistema electromecánico Lab-Volt EMS8254.

Motor universal excitado con corriente alterna. El diseño de la herramienta computacional se muestra en las tablas 7 y 8. La tabla 7 muestra los valores que deben medirse y la tabla 8 muestra los valores calculados usando los valores de la tabla 7.

Tabla 7 Valores medidos. Operación del motor universal excitado con corriente alterna.

E	Medición	τ_m	I	P	Q	n
V		lb _r ·plg	A	W	var	rpm
120	1	0				
	2	3				
	3	6				
	4	9				
	5	12				

Tabla 8 Valores calculados. Operación del motor universal excitado con corriente alterna.

τ_m	S	fp	P _m	η	R _{motor}	X _{motor}
lb _r ·plg	VA		W	%	Ω	Ω
0						
3						
6						
9						
12						

El dato de placa se determina considerando el valor más alto de la eficiencia “η”. El dato de placa propuesto se muestra en la tabla 9.

Tabla 9 Dato de placa propuesto. Motor universal excitado con corriente alterna.

E	I	P _m	n	CA/CC
V	A	W	rpm	

Finalmente, se grafican la característica mecánica n vs τ_m , y las características electromecánicas f_p vs P_m , η vs P_m , I_L vs P_m y n vs P .

Motor universal excitado con corriente directa. El diseño de la herramienta computacional se muestra en las tablas 10 y 11. La tabla 10 muestra los valores que deben medirse y la tabla 11 muestra los valores calculados usando los valores de la tabla 10.

Tabla 10 Valores medidos. Operación del motor universal excitado con corriente directa.

E	Medición	τ_m	I	P	n
V		lb _r ·plg	A	W	rpm
120	1	0			
	2	3			
	3	6			
	4	9			
	5	12			

Tabla 11 Valores calculados. Operación del motor universal excitado con corriente directa.

τ_m	P _m	η	R _{motor}
lb _r ·plg	W	%	Ω
0			
3			
6			
9			
12			

El dato de placa se determina considerando el valor más alto de la eficiencia “ η ”. El dato de placa propuesto se muestra en la tabla 12.

Tabla 12 Dato de placa propuesto. Motor universal excitado con corriente directa.

E	I	P _m	n	CA/CC
V	A	W	rpm	

	valor medido
	valor propuesto
	valor calculado
	el dato se pasa de la misma hoja

Finalmente, se grafican la característica mecánica n vs τ_m , y las características electromecánicas η vs P_m , I_L vs P_m y n vs P .

Rúbrica para evaluar las prácticas de laboratorio

Portada

La portada debe contener:

1. Nombre de la institución
2. Carrera
3. Número y nombre la práctica
4. Nombre de los estudiantes
5. Nombre del profesor
6. Fecha de entrega

En el encabezado aparece mi nombre, esto es así porque un servidor diseño la propuesta. Cuando ustedes envíen su documento deberán quitar mi nombre e incluir el encabezado (si desean incluirlo), pie de página (si desean incluirlo), logotipos (si desean incluirlos).

Objetivos

Incluir los objetivos indicados en la práctica.

Material y equipo

Incluir la lista indicada en la práctica mencionando las especificaciones técnicas del equipo.

Discusión de resultados:

Al reportar resultados calculados de las prácticas de laboratorio deben utilizar 3 cifras de precisión.

1 Deben respetar la propuesta metodológica de la práctica para mostrar resultados sin tener que repetir la redacción de los procedimientos y sin mostrar los circuitos eléctricos.

40%

2 Deben hacer observaciones (2 o más por objetivo) de los experimentos propuestos en los procedimientos (*esta redacción es en equipo*). Estas observaciones se indican en cada objetivo.

10%

Conclusiones

Deben incluir conclusiones por objetivos y son individuales.

Cada conclusión debe ser redactada en un párrafo de 5 renglones completos (el espaciado, tamaño y tipo de letra a considerar es: espacio sencillo, 10 arial o times new roman).

La conclusión es una redacción técnica haciendo referencia a la introducción, ecuaciones, cálculos y comportamientos gráficos.

20%

Demostración práctica

Deben redactar en cada objetivo (sin incluir diagramas eléctricos, cálculos, etc) que fue lo que se hizo y que interpretas de la demostración práctica del objetivo (*esta redacción es en equipo*). Cada demostración práctica debe ser redactada en un párrafo de 8 renglones completos (el espaciado, tamaño y tipo de letra a considerar es: espacio sencillo, 10 arial o times new roman). Esta sección depende de lo que haga un servidor en las demostraciones prácticas ejecutadas en el laboratorio.

30%

Aprendizaje basado en prácticas de laboratorio

Práctica 1

Determinación del dato de placa del motor de inducción con condensador de arranque y características electromecánicas

Para esta práctica se emplea el **complemento: Reto 1**.

Objetivos:

- 1 Medir las corrientes de arranque $I_{\text{arranque p}}$, $I_{\text{arranque a}}$, $I_{\text{arranque motor}}$ y el par de arranque $\tau_{\text{m arranque}}$
- 2 Obtener el dato de placa de un motor de inducción con condensador de arranque.
- 3 Análisis de la característica mecánica y características electromecánicas.

Material y equipo necesario:

Equipo Lab-Volt:

- 1 Módulo de suministro de potencia EMS8821
- 1 Motor con condensador de arranque EMS8251
- 1 Electrodinamómetro EMS8911

Equipo ULE:

- 1 Módulo de suministro de potencia (mesa ULE)

Otros:

- 1 Amperímetro de corriente alterna
- 1 wattmetro-varmetro
- 1 Multímetro
- 1 Tacómetro
- Cables

Metodología:

Observación:

1 Para el **objetivo 1** utilice el módulo de suministro de potencia (mesa ULE).

Objetivo 1

a) Cierre el interruptor de la fuente de alimentación (circuito **A**) y mida la tensión de la fase R al neutro. Registre el valor en la tabla **a**.

Tabla **a** Valor medido. Tensión de la fase R al neutro (tensión de fase).

E_{R-N} V

Abra el interruptor del circuito **A**. Conecte el circuito de la figura **a** al circuito **A**. Energice el circuito cerrando el interruptor **s** durante un lapso no mayor de **2** segundos. Mida la $I_{\text{arranque p}}$ (al

medir la corriente puede reemplazar el amperímetro con sistema motor electromagnético de hierro móvil por el amperímetro de gancho), registre el valor en la tabla **b**.

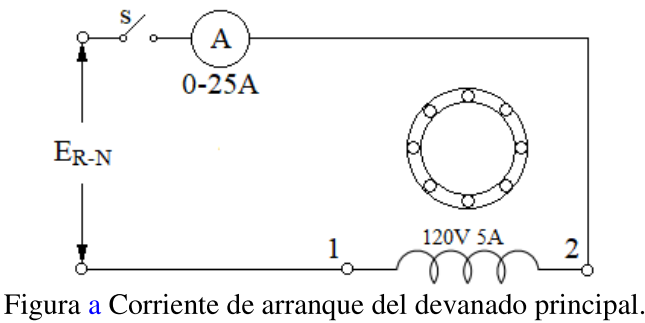


Tabla **b** Valor medido. Corriente de arranque del devanado principal.

$I_{\text{arranque p}}$
A

Abra el interruptor **s**.

Ahora, conecte la fuente de alimentación y el instrumento de medición al devanado auxiliar (figura **b**). Energice el circuito cerrando el interruptor **s** durante un lapso no mayor de **2** segundos. Mida la $I_{\text{arranque a}}$ (al medir la corriente puede reemplazar el amperímetro por el amperímetro de gancho), registre el valor en la tabla **c**.

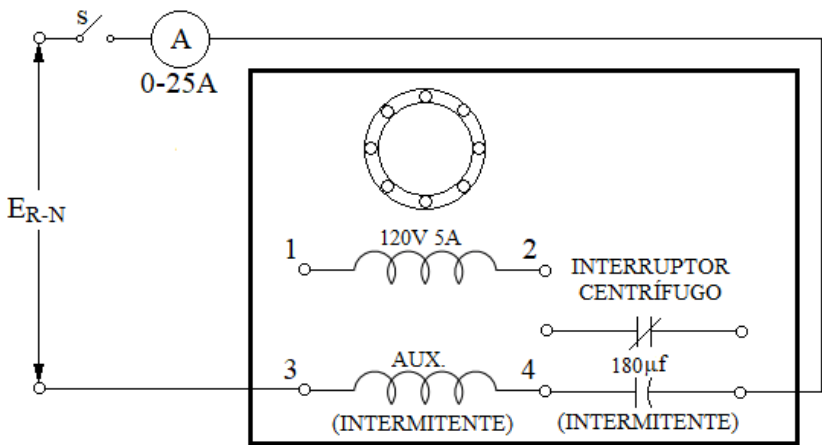


Figura **b** Corriente de arranque del devanado auxiliar del motor condensador de arranque.

Tabla **c** Valor medido. Corriente de arranque del devanado auxiliar del motor con condensador de arranque.

$I_{\text{arranque a}}$
A

Abra el interruptor **s**.

Conecte la fuente de alimentación y el instrumento de medición al circuito de la figura c. Acople el electrodinamómetro al motor monofásico de fase hendida mediante la banda. Dele toda la vuelta a la perilla de control del electrodinamómetro haciéndola girar en sentido de las manecillas del reloj para proporcionarle al motor con condensador de arranque la carga máxima. Conecte el electrodinamómetro. Energice el circuito cerrando el interruptor s durante un lapso no mayor de 2 segundos. Mida la $I_{\text{arranque motor}}$ el $\tau_{\text{m arranque}}$ (mida primero un valor y desergice y posteriormente mida el otro valor) y registre el valor en la tabla d.

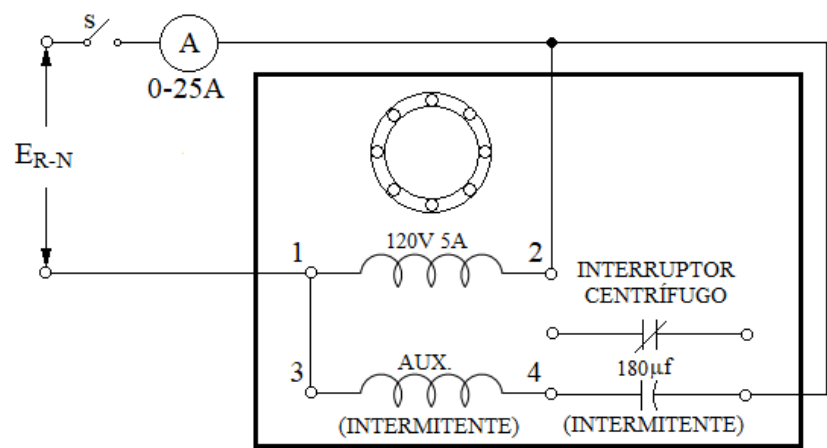


Figura c Corriente de arranque del motor condensador de arranque.

Tabla d Valor medido. Corriente de arranque y par mecánico de arranque del motor con condensador de arranque.

$I_{\text{arranque motor}}$ A	$\tau_{\text{m arranque}}$ lb·pulg

Objetivo 2

Observación:

2 Para el **objetivo 2** use el módulo de suministro de potencia EMS8821.

b) El dato de placa propuesto por el fabricante para el motor con condensador de arranque se muestra en la tabla e.

Tabla e Dato de placa del motor con condensador de arranque propuesto por el fabricante.

E	I	P _m	f	n
V	A	W	Hz	rpm
120	4.6	175	60	1715

Conecte el circuito de la figura d. Adicione al circuito un amperímetro (0-25A) y el wattmetro-vármetro. Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación. Cierre el interruptor s y ajuste la tensión hasta que E = 120V (arranque a tensión reducida). Mida los valores indicados en la tabla f.

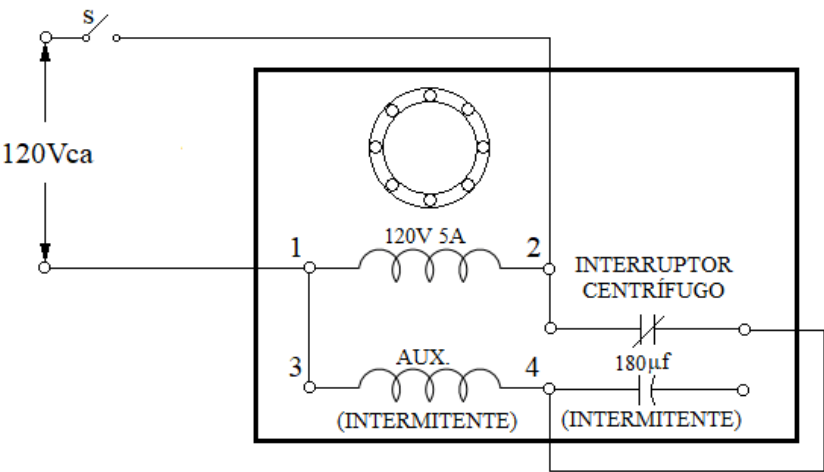


Figura d Conexión del motor con condensador de arranque.

Tabla f Valores medidos. Operación del motor con condensador de arranque.

τ_m lb _r plg	I A	P W	Q var	n rpm
0				
3				
6				
9				
12				

Abra el interruptor s y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor). Desconecte el circuito de la fuente de alimentación y desconecte el electrodinamómetro.

Calcule los valores indicados en la tabla g.

Tabla g Valores calculados. Operación del motor con condensador de arranque.

τ_m lb _r plg	S VA	fp	P _m W	η %	R _{motor} Ω	X _{motor} Ω
0						
3						
6						
9						
12						

Use el complemento: Reto 1 para proponer el dato placa (tabla h).

Tabla h Dato de placa propuesto. Motor con condensador de arranque.

E	I	P _m	f	n
V	A	W	Hz	rpm

Compare el motor monofásico de fase hendida y el motor con condensador de arranque en cuanto a los parámetros indicados en la tabla i.

Tabla i Comparación del motor monofásico de fase hendida y el motor con condensador de arranque.

Motor:	$I_{\text{arranque p}}$ A	$I_{\text{arranque a}}$ A	$I_{\text{arranque motor}}$ A	$\tau_{\text{m arranque}}$ lb _r ·plg
Monofásico de fase hendida				
Con condensador de arranque				

Observaciones:

3 El devanado principal es el mismo para ambos motores, así que los valores de las corrientes de arranque del devanado principal es el mismo.

4 El devanado auxiliar del motor con arranque por capacitor tiene una impedancia mas alta (por el capacitor en serie), y por lo tanto, toma menos corriente.

5 Con menos corriente del devanado auxiliar la corriente de arranque del motor con condensador de arranque es más baja. El capacitor sirve para limitar esta corriente a un valor menor.

6 Para el motor con condensador de arranque la deferencia de fase entre las corrientes de los devanados de operación y arranque tiende a 90°, lo que implica que el par de arranque tienda al valor máximo.

7 El dato de placa del motor con condensador de arranque es el mismo que para el motor monofásico de fase hendida.

P14 ¿Cuántas veces es mayor la corriente de arranque que la corriente nominal para el motor monofásico de fase hendida (utilice la tabla h)?

P15 ¿Cuántas veces es mayor la corriente de arranque que la corriente nominal para el motor con condensador de arranque (utilice la tabla h)?

P16 ¿Cuántas veces es mayor el par de arranque que el par nominal para el motor monofásico de fase hendida?

P17 ¿Cuántas veces es mayor el par de arranque que el par nominal para el motor con condensador de arranque?

Objetivo 3

c) Use el **complemento: Reto 1** para graficar la característica mecánica n vs τ_m , y las características electromecánicas f_p vs P_m , η vs P_m , I vs P_m y n vs P_m . Muestre los comportamientos en las figuras e, f, g, h e i.

insertar figura

Figura e Característica mecánica n vs τ_m .

insertar figura

Figura f Característica electromecánica f_p vs P_m .

insertar figura

Figura g Característica electromecánica η vs P_m .

insertar figura

Figura h Característica electromecánica I vs P_m .

insertar figura

Figura i Característica electromecánica n vs P_m .

Observación:

8 La característica mecánica y las características electromecánicas para el motor monofásico de fase hendida y el motor con condensador de arranque son las mismas porque los devanados principales son los mismos.

Sugerencias didácticas:

Construir el **complemento: Reto 1** para determinar el dato de placa y las características electromecánicas es importante porque permite comprender como opera el motor con condensador de arranque. La herramienta computacional ofrece resultados al instante (cálculos y gráficas), permitiendo discutir con el alumno para que se apodere del conocimiento.

Antes de ejecutar la práctica 1 primero conduzca el experimento inicial.

Experimento inicial:

El motor monofásico de fase hendida

Objetivo:

- 1 Determinar los parámetros R_p y X_p del devanado principal y los parámetros R_a y X_a del devanado principal auxiliar.
- 2 Medir las corrientes de arranque $I_{arranque\ p}$, $I_{arranque\ a}$, $I_{arranque\ motor}$.
- 3 Analizar la conexión del motor monofásico de fase hendida y su operación en vacío y a plena carga. Operación del motor monofásico de fase hendida.
- 4 Determinación del par mecánico de arranque $\tau_{m\ arranque}$ del motor monofásico de fase hendida.

Material y equipo necesario:

Equipo Lab-Volt:

- 1 Módulo de suministro de potencia EMS8821

1 Motor con condensador de arranque EMS8251

Equipo ULE:

- 1 Módulo de suministro de potencia (mesa ULE)
- 1 Electrodinamómetro EMS8911

Otros:

- 1 Amperímetro de corriente alterna
- 1 Amperímetro de gancho
- 1 Wattmetro-varmetro
- 1 Multímetro
- 1 Tacómetro
- Cables

Metodología:

Observación:

1 Para el **objetivo 1** utilice el módulo de suministro de potencia EMS8821.

Objetivo 1

a1) El devanado principal del motor monofásico de fase hendida se compone de muchas vueltas de alambre magneto calibre 17 (5A). El devanado auxiliar se compone de un número menor de vueltas de alambre magneto calibre 23 (0.85A). Los dos devanados van montados en el estator desplazados entre sí. La máquina es de 4 polos, así que el punto central entre dos polos del devanado principal es de 45° por lo que el devanado auxiliar está físicamente desplazado 45° del devanado principal (90° eléctricos).

Conecte el circuito de la figura **a**, adicione al circuito el wattmetro-varmetro. Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación. Cierre el interruptor de la fuente de alimentación y energice el circuito cerrando el interruptor **s**, modifique el valor de la tensión hasta que $E = 20V$. Mida **I**, **P** y **Q** y calcule la resistencia y la reactancia del devanado principal. Registre los valores en la tabla **a**.

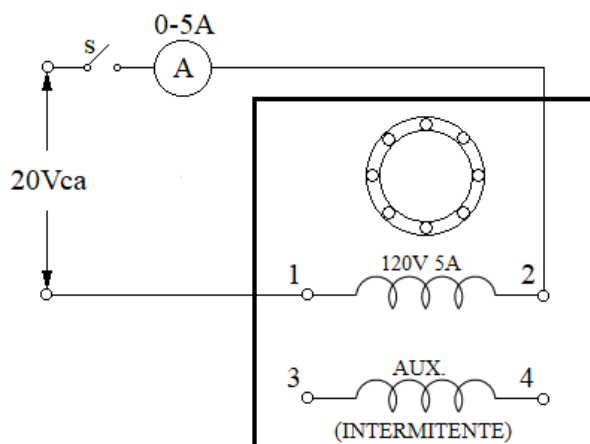


Figura **a** Cálculo de la impedancia del devanado principal.

Tabla **a** Valores medidos y calculados. $E = 20V \angle 0^\circ$. Cálculo de los parámetros del devanado principal.

I_p A	P_p W	Q_p var	R_p Ω	X_p Ω

Abra el interruptor s.

Ahora, conecte la fuente de alimentación y los instrumentos de medición al devanado auxiliar. Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación. Energice el circuito cerrando el interruptor s, modifique el valor de la tensión hasta que $E = 20V$. Mida I, P y Q y calcule la resistencia y la reactancia del devanado auxiliar. Registre los valores en la tabla **b**.

Tabla **b** Valores medidos y calculados. $E = 20V \angle 0^\circ$. Cálculo de los parámetros del devanado auxiliar.

I_a A	P_a W	Q_a var	R_a Ω	X_a Ω

Abra el interruptor s y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor). Desconecte el circuito de la fuente de alimentación.

Observación:

2 Los parámetros obtenidos son una aproximación a los valores reales ya que la tensión aplicada es solo 20V.

a2) Use los parámetros del devanado principal y los parámetros del devanado auxiliar en el **complemento: Reto 1 parte b Tema 1** (especifique $E_{rms} = 20V$ y $\alpha = 0^\circ$) y muestre en la figura **b** un diagrama fasorial indicando la posición del fasor de corriente del devanado principal y la posición del fasor de corriente del devanado auxiliar. Determine el ángulo de defasamiento entre las dos corrientes, registre el resultado en la tabla **c**. Muestre en la tabla **d** las magnitudes y ángulos de los fasores de las corrientes I_p e I_a .

insertar figura

Figura **b** Diagrama fasorial. Corriente por el devanado principal y corriente por el devanado auxiliar. Motor monofásico de fase hendida.

Tabla **c** Valor calculado. Ángulo de defasamiento entre la corriente por el devanado principal y la corriente por el devanado auxiliar. Motor monofásico de fase hendida.

$\angle$ de defasamiento entre corrientes ($^\circ$)

Tabla **d** Magnitudes y ángulos de los fasores I_p e I_a . Motor monofásico de fase hendida.

I_p		I_a	
I_p	$\angle^\circ$	I_a	$\angle^\circ$

Observación:

3 Las impedancias del devanado principal y del devanado auxiliar deben diferir por lo que ángulos de fase de las corrientes serán diferentes. Las intensidades de los campos magnéticos alcanzarán su máximo a diferentes tiempos creándose el campo magnético giratorio. Esto induce tensiones en el rotor (el rotor es una jaula de ardilla), por lo que circulan corrientes inducidas haciendo que el rotor gire. Si los devanados principal y auxiliar fueran idénticos, no habría diferencia de fase entre las corrientes que circulan por los devanados, así que, un solo campo magnético pulsante no puede hacer que el rotor gire ya que no se produce el campo magnético giratorio.

Objetivo 2

Observación:

4 Para el **objetivo 2** utilice el módulo de suministro de potencia (mesa ULE).

La figura c muestra la mesa de trabajo ULE y los 4 circuitos con las que cuenta.

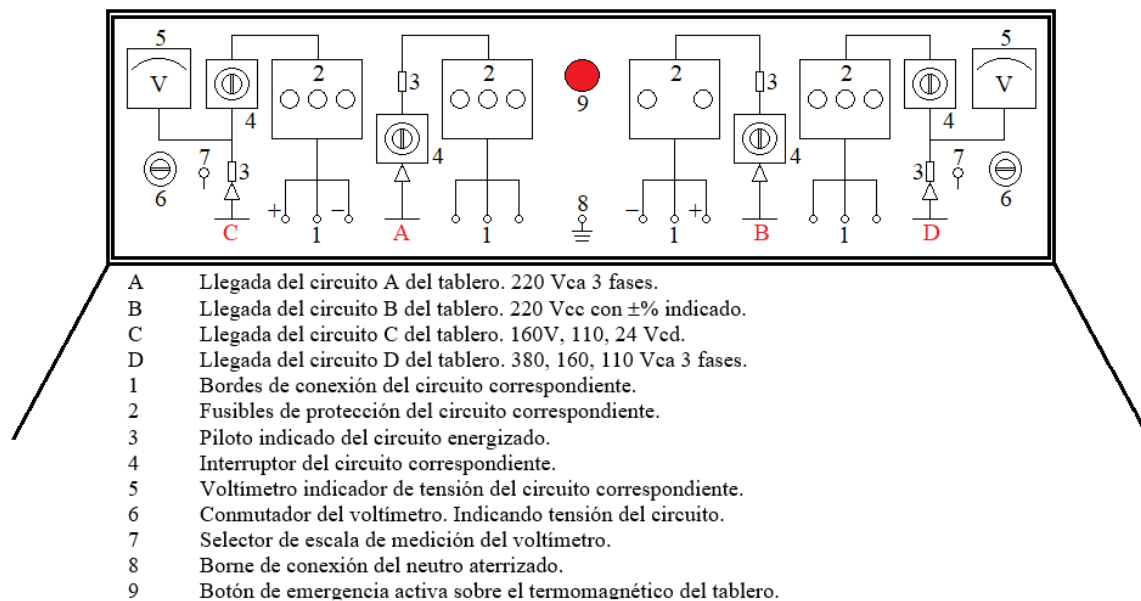


Figura c Módulo de suministro de potencia (mesa ULE).

b) Cierre el interruptor de la fuente de alimentación (circuito A) y mida la tensión de la fase R al neutro. Registre el valor en la tabla e.

Tabla e Valor medido. Tensión de la fase R al neutro (tensión de fase).

E_{R-N}
V

Abra el interruptor del circuito A. Conecte el circuito de la figura d al circuito A. Energice el circuito cerrando el interruptor s durante un lapso no mayor de 2 segundos. Mida la $I_{arranque p}$ (al

medir la corriente puede reemplazar el amperímetro con sistema motor electromagnético de hierro móvil por el amperímetro de gancho), registre el valor en la tabla **f**.

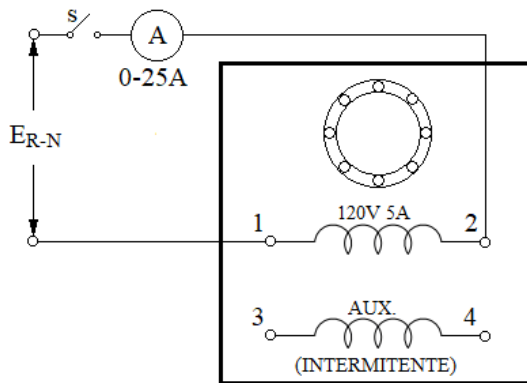


Figura **d** Corriente de arranque del devanado principal.

Tabla **f** Valor medido. Corriente de arranque del devanado principal.

$I_{\text{arranque p}}$ A

P1 ¿El motor produjo ruido?, **P2** ¿Giró el rotor?

Baje la parte delantera del módulo y, con cuidado, dele una vuelta rápida al eje del rotor en el momento en que se cierra el interruptor **s**, **P3** ¿Giró el motor?, **P4** ¿Qué determinó el sentido de rotación del motor?

Abra el interruptor **s** y coloque la parte delantera del módulo en su posición normal.

Ahora, conecte la fuente de alimentación y el instrumento de medición al devanado auxiliar. Energice el circuito cerrando el interruptor **s** durante un lapso no mayor de **2** segundos. Mida la $I_{\text{arranque a}}$ (al medir la corriente puede reemplazar el amperímetro por el amperímetro de gancho), registre el valor en la tabla **g**.

Tabla **g** Valor medido. Corriente de arranque del devanado auxiliar del motor monofásico de fase hendida.

$I_{\text{arranque a}}$ A

P5 ¿El motor produjo ruido?, **P6** ¿Giró el rotor?

Desconecte el devanado auxiliar de la fuente de alimentación. Conecte el devanado principal a la fuente de alimentación. Ahora, conecte el devanado auxiliar en paralelo al devanado principal. Verifique que el interruptor del circuito **A** este abierto. conecte la fuente de alimentación y el instrumento de medición al circuito. Acople el electrodinamómetro al motor monofásico de fase hendida mediante la banda. Dele toda la vuelta a la perilla de control del electrodinamómetro haciéndola girar en sentido de las manecillas del reloj para proporcionarle al motor monofásico de

fase hendida la carga máxima. Conecte el electrodinamómetro a la fuente de alimentación (tensión de fase). Energice el circuito cerrando el interruptor s durante un lapso no mayor de 2 segundos. Mida la $I_{\text{arranque motor}}$ (al medir la corriente puede reemplazar el amperímetro por el amperímetro de gancho), registre el valor en la tabla **h**.

Tabla **h** Valor medido. Corriente de arranque del motor monofásico de fase hendida.

$I_{\text{arranque motor}} \text{ (A)}$

P7 ¿Arrancó el motor?, **P8** ¿Produjo mucho ruido el motor?

P9 ¿El sentido de rotación es hacia la izquierda o hacia la derecha?

Intercambie los cables que van al devanado auxiliar y cierre el interruptor s durante un lapso no mayor de 2 segundos, **P10** ¿El sentido de rotación cambió?

Abra el interruptor de la fuente de alimentación del circuito A y desconecte el circuito de la fuente de alimentación.

Objetivo 3

Observación:

5 Para el **objetivo 3** utilice el módulo de suministro de potencia EMS8821.

c1) Conecte el circuito de la figura **e**, adicione al circuito un ampérmetro (0-25A) y el wattmetro-vármetro. Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación. Cierre el interruptor de la fuente de alimentación y energice el circuito cerrando el interruptor s , modifique el valor de la tensión hasta que $E = 120\text{V}$ (arranque a tensión reducida).

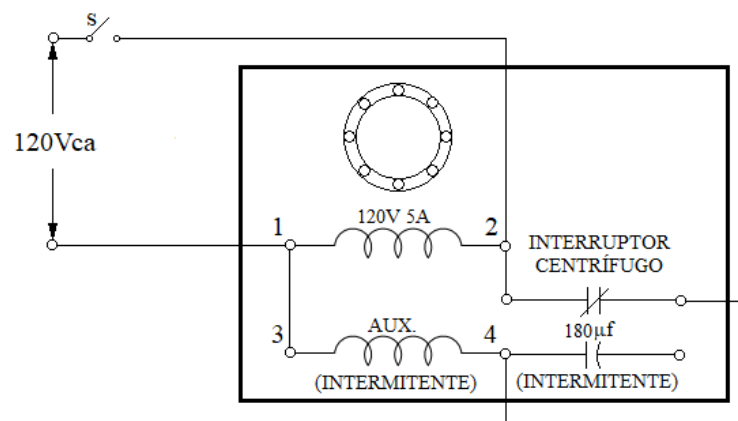


Figura **e** Conexión del motor monofásico de fase hendida.

Abra el interruptor s . Cierre el interruptor s cuidando el alcance en corriente del wattmetro-varmetro (ahora el motor arrancó a tensión plena). Recuerde que la corriente de arranque es de 4 a 5 la corriente nominal. Mida los valores indicados en la tabla **i**.

Tabla i Valores medidos y calculados. Operación en vacío.

$I_{\text{vacío}}$ A	$P_{\text{vacío}}$ W	$Q_{\text{vacío}}$ var	$n_{\text{vacío}}$ rpm	$R_{\text{motor vacío}}$ Ω	$X_{\text{motor vacío}}$ Ω

P11 ¿Se puso en marcha el motor?

P12 ¿Funcionó el interruptor centrífugo?

P13 ¿Cuál es su estimación con relación al tiempo de arranque?

Abra el interruptor s y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor).

c2) Acople el electrodinamómetro al motor monofásico de fase hendida mediante la banda.

Cálculo del par nominal (τ_{nominal}).

El par mecánico se define por:

$$\tau_m = \frac{P_m}{\omega} \sin \theta = \frac{P_e - \text{pérdidas}}{\omega} \sin \theta \quad \text{N}\cdot\text{m}$$

donde

θ Ángulo de defasamiento entre la corriente de excitación del estator y la corriente del rotor

Considerando el **subtema 5.4** θ tiende a 90° , por lo tanto:

$$\tau_m = \frac{P_m}{\omega} \quad \text{N}\cdot\text{m}$$

De manera práctica la velocidad de la máquina puede obtenerse usando un tacómetro.

$$\left(n \frac{\text{rev}}{\text{min}}\right) \times \left(\frac{2\pi \text{rad}}{1 \text{rev}}\right) \times \left(\frac{1 \text{min}}{60 \text{s}}\right) = 0.104719755 \left(n \frac{\text{rev}}{\text{min}}\right) \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Por lo tanto:

$$\tau_m = \frac{P_m}{0.104719755 \left[n \left(\frac{\text{rev}}{\text{min}}\right)\right]} \quad \text{N}\cdot\text{m}$$

Ahora:

$$1 \text{ lb}_f = 4.4482 \text{ N}$$

$$(\tau_m \text{ N}\cdot\text{m}) \times \left(\frac{1 \text{ lb}_f}{4.4482 \text{ N}}\right) \times \left(\frac{100 \text{cm}}{1 \text{m}}\right) \times \left(\frac{1 \text{plg}}{2.54 \text{cm}}\right) = 8.8507888 (\tau_m \text{ N}\cdot\text{m}) \quad \text{lb}_f\cdot\text{plg}$$

Por lo que:

$$\tau_m = \left[\frac{P_m}{0.104719755 \left[n \frac{\text{rev}}{\text{min}} \right]} \right] 8.8507888 \text{ lb}_f\text{-plg}$$

Use la tabla **e** de la **Práctica 1** para calcular el par nominal y registre el resultado en la tabla **j**.

Tabla **j** Valor calculado. Par mecánico nominal del motor monofásico de fase hendida.

τ_m nominal lb _f -plg

Conecte al electrodinamómetro a la fuente de alimentación (tensión de fase). Cierre el interruptor s cuidando el alcance en corriente del wattmetro-varmetro. Mida y registre los valores indicados en la tabla **k** para el par nominal registrado en la tabla **j**.

Tabla **k** Valores medidos y calculados. Operación a plena carga.

I _{nominal} A	P _{nominal} W	Q _{nominal} var	n _{nominal} rpm	R _{motor nominal} Ω	X _{motor nominal} Ω

Tire la carga. Mida y registre los valores indicados en la tabla **l**.

Tabla **l** Valores medidos. Operación del motor monofásico de fase hendida.

τ_m lb _f -plg	I A	P W	Q var	n rpm
0				
3				
6				
9				
12				

Abra el interruptor s y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor). Desconecte el circuito de la fuente de alimentación y desconecte el electrodinamómetro.

Calcule los valores indicados en la tabla **m**.

Tabla **m** Valores calculados. Operación del motor monofásico de fase hendida.

τ_m lb _f -plg	S VA	fp	P _m W	η %	R _{motor} Ω	X _{motor} Ω
0						
3						
6						
9						
12						

Objetivo 4

Observación:

6 Para el **objetivo 4** utilice el módulo de suministro de potencia (mesa ULE).

c1) Verifique que el interruptor del circuito **A** este abierto. Conecte el circuito de la figura **e** al circuito **A** de la mesa de trabajo (no conecte al circuito ningún instrumento de medición). Dele toda la vuelta a la perilla de control del electrodinamómetro haciéndola girar en sentido de las manecillas del reloj para proporcionarle al motor de fase hendida la carga máxima al arranque.

Conecte el electrodinamómetro. Energice el circuito cerrando el interruptor **s** durante un lapso no mayor de **2** segundos. Mida el $\tau_{m \text{ arranque}}$, registre el valor en la tabla **n**.

Tabla **n** Valor medido. Par de arranque del motor monofásico de fase hendida.

$\tau_{m \text{ arranque}}$ lb·plg

Reporte del equipo:

Incluya el **experimento inicial** en la sección discusión de resultados de la **práctica de laboratorio 1** (al iniciar la sección).

Ver la rúbrica para evaluar prácticas de laboratorio.

Referencia:

Diseño del complemento:

Práctica 1

“**Tema 2**” de la asignatura “**Máquinas Eléctricas**”

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del

Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Experimento de laboratorio No. 31 “El motor monofásico de fase hendida, parte I”,

32 “El motor monofásico de fase hendida, parte II”,

33 “El motor monofásico de fase hendida, parte III”

y 34 “El motor con arranque por capacitor”:

Experimentos base para el diseño del complemento: Práctica 1

EXPERIMENTOS CON EQUIPO ELÉCTRICO

Theodore Wildi, Michael J. De Vito

Editorial Limusa, México. 1975

Lab-Volt, Sistemas Educativos

Práctica 2

Determinación del dato de placa del motor de inducción con condensador de marcha y características electromecánicas

Para esta práctica se emplea el **complemento: Reto 2**.

Para esta práctica se emplea el **complemento: Reto 2 Tema 4**.

Objetivos:

- 1 Analizar el campo magnético giratorio producido por un motor elemental con condensador de marcha.
- 2 Obtener el dato de placa de un motor de inducción con condensador de marcha.
- 3 Análisis de la característica mecánica y características electromecánicas.

Material y equipo necesario:

Equipo Lab-Volt:

- 1 Módulo de suministro de potencia EMS8821
- 1 Motor con condensador de marcha EMS8253
- 1 Electrodinamómetro EMS8911

Otros:

- 1 Prototipo “motor elemental con condensador de marcha”
- 1 Amperímetro de corriente alterna
- 1 Wattmetro-varmetro
- 1 Multímetro
- 1 Tacómetro
- Cables

Metodología:

Objetivo 1

La figura a muestra el prototipo “motor elemental con condensador de marcha”.



Figura a Prototipo “motor elemental con condensador de marcha”. La bobina 1 envuelve a la bobina 2.

Las bobinas fueron construidas con alambre magneto calibre 18 (3A). La bobina circular interna (bobina 2) opera como el devanado principal y la bobina circular externa (bobina 1) opera como el devanado auxiliar. La bobina 1 puede girar 90° en sentido horario o en sentido antihorario. En la figura b se muestra como la bobina 1 giro 90° en sentido antihorario.

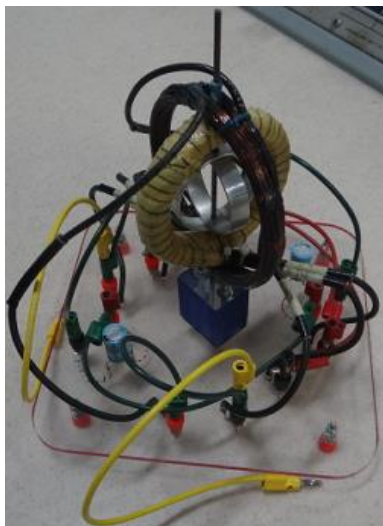


Figura b La bobina 1 giro 90° en sentido antihorario. El rotor del motor son dos anillos perforados e insertados en una varilla de $1/8''$.

La figura c muestra la conexión del prototipo “motor elemental con condensador de marcha” hacia una fuente de alimentación (transformador 125/12Vca 3A).

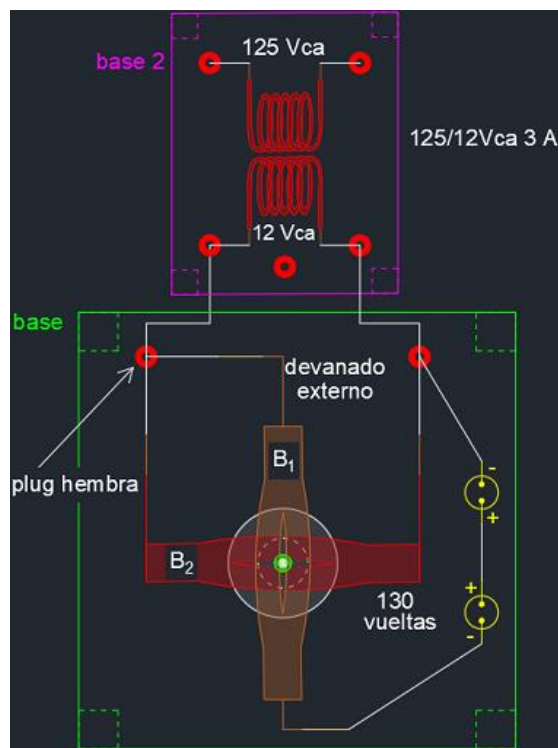


Figura c Conexión del prototipo “motor elemental con condensador de marcha”.

Observación:

1 Para las metodologías “a1)-a4)” use el complemento: Reto 1 parte b Tema 1 y para las metodologías “a5)-a7)” el complemento: Reto 2 Tema 4.

a1) Coloque las bobinas como lo muestra la figura b. Conecte al devanado auxiliar (bobina 1 en serie con dos capacitores electrolíticos polarizados) un interruptor s, un amperímetro (0-5A) y el wattmetro-vármetro. Conecte el circuito al transformador. Cierre el interruptor s y mida los valores indicados en la tabla a y calcule los valores indicados en la tabla b.

Tabla a Valores medidos. I_a , P_a y Q_a . Devanado auxiliar.

I_a (A)	P_a (W)	Q_a (var)

Tabla b Valores calculados. Parámetros del devanado auxiliar.

R_a (Ω)	X_a (Ω)

Introduzca los parámetros del devanado auxiliar en la herramienta computacional (HC) y considere que $E = 12\angle 0^\circ$. Registre los valores indicados en la tabla c y d.

Tabla c Valores calculados por la HC. I_a , θ_a y fp_a . Devanado auxiliar.

I_a (A)	$\angle I_a$ ($^\circ$)	fp_a

Tabla d Valores calculados por la HC. Flujos de potencia. Devanado auxiliar.

P_a (W)	Q_a (var)	S_a (VA)

Muestre el gráfico en función del tiempo indicado en la figura d, el diagrama fasorial indicado en la figura e y el triángulo de potencias solicitado en la figura f.

insertar figura

Figura d Gráfico en función del tiempo, $\alpha = 0^\circ$, $t = 0$ s. Factor de ampliación para la corriente = 3. Devanado auxiliar.

insertar figura

Figura e Diagrama fasorial, $\alpha = 0^\circ$, $t = 0$ s. Factor de ampliación para corriente = 3. Devanado auxiliar.

insertar figura

Figura f Triángulo de potencias. Devanado auxiliar.

Abra el interruptor s.

a2) Coloque las bobinas como lo muestra la figura b. Conecte al devanado principal un interruptor s, un amperímetro (0-5A) y el wattmetro-vármetro. Conecte el circuito al transformador. Cierre el

interruptor s y mida los valores indicados en la tabla e y calcule los valores indicados en la tabla f.

Tabla e Valores medidos. I_p , P_p y Q_p . Devanado principal.

I_p (A)	P_p (W)	Q_p (var)

Tabla f Valores calculados. Parámetros del devanado principal.

R_p (Ω)	X_p (Ω)

Introduzca los parámetros del devanado principal en la herramienta computacional (HC) y considere que $E = 12\angle 0^\circ$. Registre los valores indicados en la tabla g y h.

Tabla g Valores calculados por la HC. I_p , θ_p y fp_p . Devanado principal.

I_p (A)	$\angle I_p$ ($^\circ$)	fp_p

Tabla h Valores calculados por la HC. Flujos de potencia. Devanado principal.

P_p (W)	Q_p (var)	S_p (VA)

Muestre el gráfico en función del tiempo indicado en la figura g, el diagrama fasorial indicado en la figura h y el triángulo de potencias solicitado en la figura i.

insertar figura

Figura g Gráfico en función del tiempo, $\alpha = 0^\circ$, $t = 0$ s. Factor de amplificación para la corriente = 3. Devanado principal.

insertar figura

Figura h Diagrama fasorial, $\alpha = 0^\circ$, $t = 0$ s. Factor de ampliación para corriente = 3. Devanado principal.

insertar figura

Figura i Triángulo de potencias. Devanado principal.

Abra el interruptor s.

a3) Coloque las bobinas como lo muestra la figura b. Conecte al motor con condensador de marcha un interruptor s, un amperímetro (0-5A) y el wattmetro-vármetro. Conecte el circuito al transformador. Cierre el interruptor s y mida los valores indicados en la tabla i y calcule los valores indicados en la tabla j.

Tabla i Valores medidos. I_m , P_m y Q_m . Motor con condensador de marcha.

I_m (A)	P_m (W)	Q_m (var)

Tabla **j** Valores calculados. Motor con condensador de marcha.

$R_m (\Omega)$	$X_m (\Omega)$

Introduzca los parámetros del motor con condensador de marcha en la herramienta computacional (HC) y considere que $E = 12 \angle 0^\circ$. Registre los valores indicados en la tabla **k** y **l**.

Tabla **k** Valores calculados por la HC. I_p , θ_p y fp_m . Motor con condensador de marcha.

$I_m (A)$	$\angle I_m (^\circ)$	fp_m

Tabla **l** Valores calculados por la HC. Flujos de potencia. Motor con condensador de marcha.

$P_m (W)$	$Q_m (var)$	$S_m (VA)$

Muestre el gráfico en función del tiempo indicado en la figura **j**, el diagrama fasorial indicado en la figura **k** y el triángulo de potencias solicitado en la figura **l**.

insertar figura

Figura **j** Gráfico en función del tiempo, $\alpha = 0^\circ$, $t = 0$ s. Factor de amplificación para la corriente = 3. Motor con condensador de marcha.

insertar figura

Figura **k** Diagrama fasorial, $\alpha = 0^\circ$, $t = 0$ s. Factor de ampliación para corriente = 3. Motor con condensador de marcha.

insertar figura

Figura **l** Triángulo de potencias. Motor con condensador de marcha.

Abra el interruptor **s**.

a4) Sume los fasores I_p e I_a para obtener I_m . Registre el resultado en la tabla **m**.

Tabla **m** Valor calculado. $I_m = I_p + I_a$.

$I_m = I_p + I_a$	
I_m	$\angle I_m (^\circ)$

En la figura **m** muestre los fasores E , I_a (tabla **c**) sumado con I_p (tabla **g**), I_m (tabla **k**) e I_m (tabla **m**).

insertar figura

Figura **m** Diagrama fasorial. Fasores E , I_a (tabla **c**) sumado con I_p (tabla **g**), I_m (tabla **k**) e I_m (tabla **m**). Factor de amplificación para las corrientes = 1.

Determine el ángulo de defasamiento entre I_p e I_a , registre el resultado en la tabla **n**.

Tabla **n** Valor calculado. Ángulo de defasamiento entre la corriente por el devanado principal I_p y la corriente por el devanado auxiliar I_a . Motor con condensador de marcha.

$\angle$ de defasamiento entre corrientes ($^\circ$)

P1 ¿Se seleccionó cuidadosamente el valor del capacitor? Explique.

a5) Introduzca los parámetros del devanado auxiliar (tabla **b**) y los parámetros del devanado principal (tabla **f**) en la HC, recuerde que $E_p = 12\angle 0^\circ$ y además la posición física de la bobina 1 con respecto a la bobina 2 es -90° . Muestre en las figuras **n**, **o** y **p** el diagrama fasorial “campo magnético giratorio” para $t = 0s$, $t = 0.003s$ y $t = 0.006s$.

insertar figura

Figura **n** Campo magnético giratorio, rotación: antihorario, $t = 0s$.

insertar figura

Figura **o** Campo magnético giratorio, rotación: antihorario, $t = 0.003s$.

insertar figura

Figura **p** Campo magnético giratorio, rotación: antihorario, $t = 0.006s$.

P2 ¿Aparece el giratorio derecho?

P3 ¿El rotor de la máquina se frena? Explique usando las magnitudes de los giratorios izquierdo y derecho para la figura **p** (tabla **o**).

Tabla **o** Magnitudes y ángulos de los giratorios izquierdo y derecho.

giratorio izquierdo		giratorio derecho	
magnitud	$\angle^\circ$	magnitud	$\angle^\circ$

a6) Verifique que el sentido de rotación de la máquina se invierte intercambiando los cables de conexión del devanado auxiliar (use la figura **c**). Cambie el sentido de rotación del campo magnético giratorio en la HC (la posición física de la bobina 1 con respecto a la bobina 2 es 90°). Muestre en las figuras **q**, **r** y **s** el diagrama fasorial “campo magnético giratorio” para $t = 0s$, $t = 0.003s$ y $t = 0.006s$.

insertar figura

Figura **q** Campo magnético giratorio, rotación: horario, $t = 0s$.

insertar figura

Figura **r** Campo magnético giratorio, rotación: horario, $t = 0.003s$.

insertar figura

Figura **s** Campo magnético giratorio, rotación: horario, $t = 0.006s$.

a7) Coloque las bobinas como se muestra en la figura **a** (la posición física de la bobina 1 con respecto a la bobina 2 es 0°). Conecte al motor con condensador de marcha un interruptor **s**, y conecte el circuito al transformador. Cierre el interruptor **s**, **P4** ¿El rotor de la máquina gira? Explique.

Use la HC y muestre en las figuras **t**, **u** y **v** el diagrama fasorial “campo magnético pulsante” para $t = 0s$, $t = 0.003s$ y $t = 0.006s$.

insertar figura

Figura **t** Campo magnético pulsante, $t = 0s$.

insertar figura

Figura **u** Campo magnético pulsante, $t = 0.003s$.

insertar figura

Figura **v** Campo magnético pulsante, $t = 0.006s$.

a8) Gire la bobina **B1** 90° en sentido horario. Conecte al motor con condensador de marcha un interruptor **s**, y conecte el circuito al transformador. Cierre el interruptor **s**, **P4** ¿El sentido de rotación es horario o antihorario?

Objetivo 2

Observación:

1 Para los objetivos 2 y 3 use el complemento: Reto 2.

b1) Los dos devanados del estator del motor con condensador de marcha son idénticos y se componen de numerosas vueltas de alambre magneto calibre 18 (3A). Los dos devanados van montados en el estator desplazados entre sí. La máquina es de 4 polos, así que el punto central entre dos polos del devanado principal es de 45° por lo que el devanado auxiliar está físicamente desplazado 45° del devanado principal (90° eléctricos).

El dato de placa propuesto por el fabricante para el motor con condensador de marcha se muestra en la tabla **p**.

Tabla **p** Dato de placa del motor con condensador de marcha propuesto por el fabricante.

E (V)	I (A)	P_m (W)	f (Hz)	n (rpm)
120	2.8	175	60	1715

Calcule el par nominal y registre el resultado en la tabla **q**.

Tabla **q** Valor calculado. Par mecánico nominal del motor con condensador de marcha.

$\tau_{m \text{ nominal}}$ (lb·pulg)

Conecte el circuito de la figura w. Adicione al circuito el wattmetro-vármetro. Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación. Acople el electrodinamómetro al motor con condensador de marcha mediante la banda. Dele toda la vuelta a la perilla de control del electrodinamómetro haciéndola girar en sentido de las manecillas del reloj para proporcionarle al motor con condensador de marcha la carga mínima. Conecte el electrodinamómetro a la fuente de alimentación (tensión de fase). Cierre el interruptor s y ajuste la tensión hasta que $E = 120V$ (arranque a tensión reducida). Mida y registre en la HC los valores indicados en la tabla r.

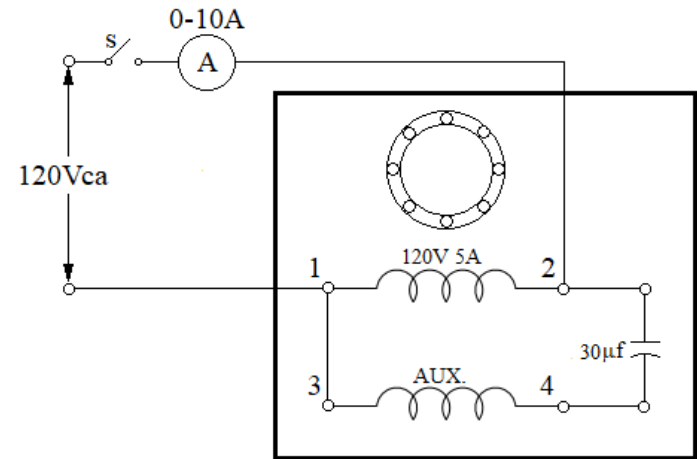


Figura w Conexión del motor con condensador de marcha.

Tabla r Valores medidos. Operación del motor con condensador de marcha.

τ_m lb _r plg	I A	P W	Q var	n rpm
0				
3				
6				
9				
12				

Abra el interruptor s y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor).

Calcule los valores indicados en la tabla s.

Tabla s Valores calculados. Operación del motor con condensador de marcha.

τ_m lb _r plg	S VA	fp	P _m W	η %	R _{motor} Ω	X _{motor} Ω
0						
3						
6						
9						
12						

Use la HC proponer el dato placa (tabla t).

Tabla t Dato de placa propuesto. Motor con condensador de marcha.

E (V)	I (A)	P _m (W)	f (Hz)	n (rpm)

P5 ¿Es un capacitor electrolítico no polarizado?

P6 ¿Observó alguna diferencia notable en el nivel de vibración del motor, al cambiar la condición de vacío a la de plena carga?

b2) Dele toda la vuelta a la perilla de control del electrodinamómetro haciéndola girar en sentido de las manecillas del reloj para proporcionarle al motor con condensador de arranque la carga máxima. Conecte el electrodinamómetro. Energice el circuito cerrando el interruptor s durante un lapso no mayor de 2 segundos. Mida la $I_{\text{arranque motor}}$ el $\tau_m \text{ arranque}$ y registre los valores en la tabla u (mida primero un valor y desenergice y posteriormente mida el otro valor).

Tabla u Valor medido. Corriente de arranque y par mecánico de arranque del motor con condensador de marcha.

$I_{\text{arranque motor}}$ A	$\tau_m \text{ arranque}$ lb·ft·plg

Desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor). Desconecte el circuito de la fuente de alimentación y desconecte el electrodinamómetro.

Observación:

1 El motor con condensador de marcha tiene un par mecánico de arranque inferior que el motor monofásico de fase hendida o el motor con condensador de arranque.

2 A plena carga el motor con condensador de marcha se comporta como una “resistencia”. Puesto que el motor “no” demanda Q el motor no “vibra”.

P7 ¿Cuántas veces es mayor la corriente de arranque que la corriente de operación a plena carga (use la tabla t)?

P8 ¿Cómo puede cambiar el sentido de rotación de un motor con condensador de marcha?

P9 ¿Por qué se deben usar capacitores es aceite en motores con condensador de marcha, en lugar de emplear capacitores electrolíticos no polarizados?

Objetivo 3

c) Use el **complemento: Reto 2** para graficar la característica mecánica n vs τ_m , y las características electromecánicas f_p vs P_m , η vs P_m , I vs P_m y n vs P_m . Muestre los comportamientos en las figuras x, y, z, aa e ab.

insertar figura

Figura **x** Característica mecánica n vs τ_m .

insertar figura

Figura **y** Característica electromecánica f_p vs P_m .

insertar figura

Figura **z** Característica electromecánica η vs P_m .

insertar figura

Figura **aa** Característica electromecánica I vs P_m .

insertar figura

Figura **ab** Característica electromecánica n vs P_m .

Sugerencias didácticas:

Construir el **complemento: Reto 2** para determinar el dato de placa y las características electromecánicas es importante porque permite comprender como opera el motor de operación continua por capacitor. La herramienta computacional ofrece resultados al instante (cálculos y gráficas), permitiendo discutir con el alumno para que se apodere del conocimiento.

Los **complementos: Reto 1 y 2 Tema 4** son importantes porque permite comprender como se produce el campo magnético pulsante en una bobina, el campo magnético giratorio en el motor monofásico de fase hendida, el campo magnético giratorio en el motor con condensador de arranque y en el motor con condensador de marcha para cualquier condición de operación. Estas herramientas computacionales ofrecen resultados al instante (datos, cálculos, gráficas y diagramas vectoriales), lo que permite discutir con el alumno para que se apodere del conocimiento.

El **complemento: Reto 1 parte b Tema 1** es importante porque comprender como se comporta el devanado auxiliar, el devanado de operación y el motor con condensador de marcha. Ésta herramienta computacional ofrece resultado al instante (datos, cálculos, diagramas vectoriales, gráficos en función del tiempo y triángulos de potencia), lo que permite discutir con el alumno para que se apodere del conocimiento.

Para el **objetivo 2**. La inercia del rotor (dos anillos perforados e insertados en una varilla de 1/8”) es tal que para tensiones inferiores a 12V no gire. Para 12V la corriente por el devanado principal supera 3A, superando la corriente de diseño del alambre magneto (cal 18) y superando la corriente de diseño del transformador. La figura **ac** muestra un sistema tal que para 6V el rotor gira libremente (la inercia es prácticamente nula). Para 6V todas las tres corrientes se van aproximadamente a la mitad lo que implica que el motor pueda trabajar indefinidamente.

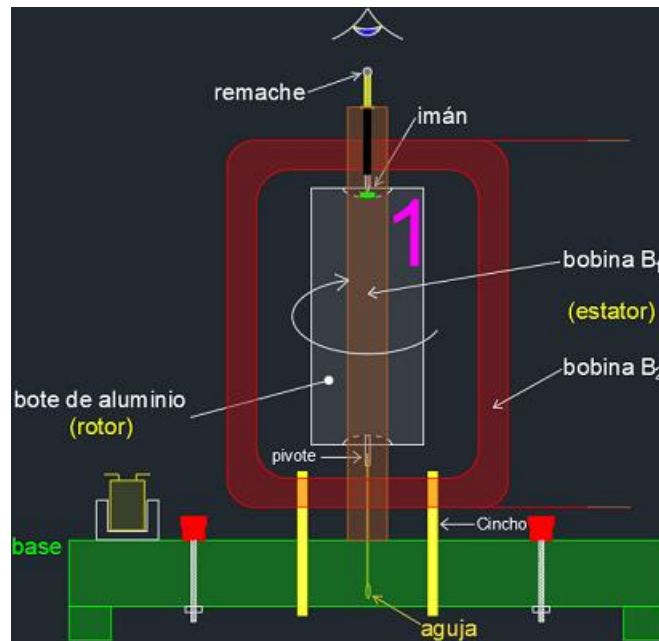


Figura ac Para 6V el rotor gira libremente.

Reporte del equipo:

Ver la rúbrica para evaluar prácticas de laboratorio.

Referencias:

Diseño del complemento:

Práctica 2 Objetivo 1 y 3

“**Tema 5**” de la asignatura “**Máquinas Eléctricas**”

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Experimento de laboratorio No. 35 “El motor de operación continua por capacitor”:

Práctica 2 Objetivo 2

EXPERIMENTOS CON EQUIPO ELÉCTRICO

Theodore Wildi, Michael J. De Vito

Editorial Limusa, México. 1975

Lab-Volt, Sistemas Educativos

Práctica 3

Determinación del dato de placa del motor universal y características electromecánicas

Para esta práctica se emplea el **complemento: Reto 3**.

Objetivos:

- 1 Obtener el dato de placa de un motor universal.
- 2 Análisis de la característica mecánica y características electromecánicas.
- 3 Determinación del par mecánico de arranque $\tau_{m \text{ arranque}}$ del motor universal tanto en corriente alterna como en corriente directa.
- 4 Operación no compensada.

Material y equipo necesario:

Equipo Lab-Volt:

- 1 Módulo de suministro de potencia EMS8821
- 1 Motor universal EMS8254
- 1 Electrodinamómetro EMS8911
- 1 Banda

Otros:

- 1 Amperímetro de corriente alterna
- 1 Amperímetro de corriente directa
- 1 Wattmetro-varmetro
- 1 Multímetro
- 1 Tacómetro
- Cables

Metodología:

Los devanados serie y compensador están montados en el estator desplazados entre sí. La máquina es de 4 polos, así que el punto central entre dos polos del devanado serie es de 45° por lo que el devanado compensador está físicamente desplazado 45° del devanado serie (90° eléctricos), ambos devanados están bobinados con alambre magneto calibre 18 (3A). El devanado de armadura está montado en el rotor y opera con 120V, 3A. La posición de las escobillas se indica mediante una línea roja marcada en la carcasa del motor. Las escobillas se pueden ubicar en el conmutador moviendo la palanca a la derecha o a la izquierda.

1) Cálculo del par mecánico nominal del motor universal. Calcule el par nominal y registre el resultado en la tabla **b**.

El dato de placa propuesto por el fabricante para el motor universal se muestra en la tabla **a**.

Tabla **a** Dato de placa del motor universal propuesto por el fabricante.

E (V)	I (A)	P_m (W)	n (rpm)	CA/CC
120	3	175	1800	

Tabla **b** Valor calculado. Par mecánico nominal del motor universal.

$\tau_{m \text{ nominal}}$ (lb _r plg)

2) Determinación de la posición neutra de las escobillas. Conecte el circuito mostrado en la figura a.

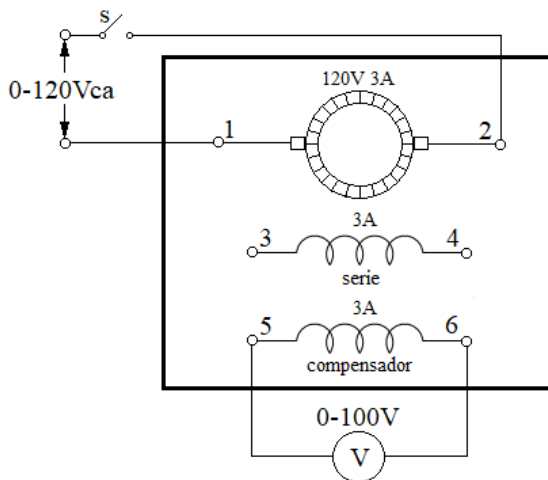


Figura a Determinación de la posición neutra de las escobillas.

Reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación. Cierre el interruptor s y ajuste la tensión hasta que $E = 80\text{Vca}$ a la armadura. Mueva las escobillas de una posición extrema a la otra. Observará que, al girar las escobillas el voltaje aumenta y luego disminuye cuando éstas se acercan a la otra posición extrema. **Deje las escobillas en la posición en que el voltaje inducido llega al máximo.** Cada vez que se use el motor universal se deben colocar las escobillas en la posición neutra.

Abra el interruptor s , reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor).

3) Motor conductivamente compensado. Conecte el circuito mostrado en la figura b.

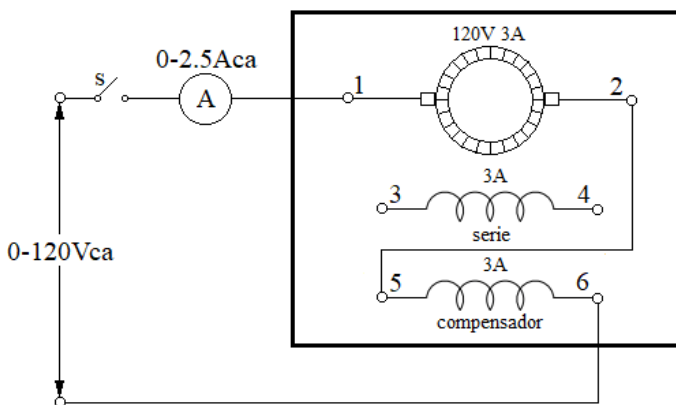


Figura b Determinación del motor conductivamente compensado.

Cierre el interruptor s y ajuste la tensión hasta que $E = 30\text{Vca}$. Si la corriente es menor que 1Aca al aplicar 30Vca , el devanado de compensación está produciendo un flujo magnético en el mismo sentido que el de la armadura, incrementando con ello la inductancia y por consecuencia la reactancia. Si esto sucede, intercambie los cables de la armadura o los del devanado de compensación, registre en la tabla a la corriente.

Tabla a Corriente por el devanado de armadura y el devanado de compensación.
Motor conductivamente compensado.

Ica
A

Abra el interruptor s, reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor).

Observación:

2 Si gira la armadura, las escobillas no están exactamente en la posición neutra.

3 El devanado de compensación tiene la función importante de reducir la reactancia general del motor, y además, desempeña la función vital de oponerse a la reacción de la armadura, mejorando con esto la conmutación. Un motor universal no compensado pierde casi toda su potencia. Al mismo tiempo, aumenta considerablemente el chisporroteo en las escobillas.

Objetivo 1

Observación:

1 Para los objetivos 1 y 2 use el complemento: Reto 3.

a1) Motor universal excitado con corriente alterna. Conecte el circuito mostrado en la figura c.

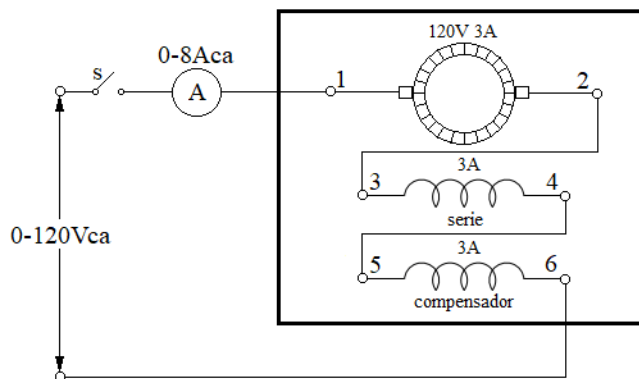


Figura c Motor universal excitado con corriente alterna.

Observación:

4 Recuerde que debe tener las mismas conexiones de los devanados de armadura y compensación que en la metodología “3”.

Acople el electrodinamómetro al motor universal mediante la banda. Adicione al circuito de la figura c un wattmetro-vármetro. Dele toda la vuelta a la perilla de control del electrodinamómetro haciéndola girar en sentido de las manecillas del reloj para proporcionarle al motor universal la carga mínima. Conecte el electrodinamómetro a la fuente de alimentación (tensión de fase). Cierre

el interruptor s y ajuste la tensión hasta que $E = 120V_{ca}$ (arranque a tensión reducida). Mida y registre en la HC los valores indicados en la tabla **b**.

Tabla **b** Valores medidos. Operación del motor universal excitado con corriente alterna.

τ_m lb $\cdot$ plg	I A	P W	Q var	n rpm
0				
3				
6				
9				
12				

Abra el interruptor s , reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor).

Calcule los valores indicados en la tabla **c**.

Tabla **c** Valores calculados. Operación del motor universal excitado con corriente alterna.

τ_m lb $\cdot$ plg	S VA	fp	P_m W	η %	R_{motor} Ω	X_{motor} Ω
0						
3						
.						
12						

Use la HC proponer el dato placa (tabla **d**).

Tabla **d** Dato de placa propuesto. Motor universal excitado con corriente alterna.

E (V)	I (A)	P_m (W)	n (rpm)	CA/CC

a2) Motor universal excitado con corriente directa. Conecte el circuito mostrado en la figura **d**.

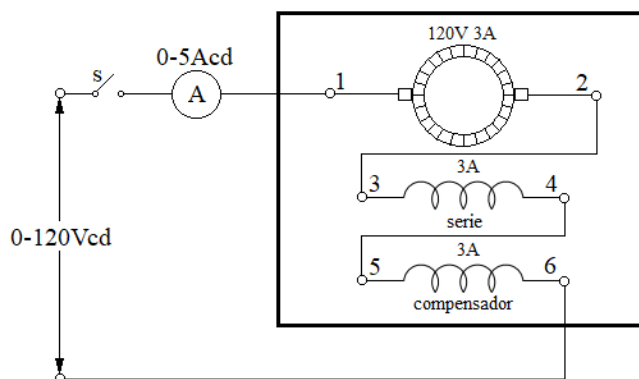


Figura **d** Motor universal excitado con corriente directa.

Observación:

5 Recuerde que debe tener las mismas conexiones de los devanados de armadura y compensación que en la metodología “3”.

Adicione al circuito de la figura d un wattmetro. Dele toda la vuelta a la perilla de control del electrodinamómetro haciéndola girar en sentido de las manecillas del reloj para proporcionarle al motor universal la carga mínima. Conecte el electrodinamómetro a la fuente de alimentación (tensión de fase). Cierre el interruptor s y ajuste la tensión hasta que $E = 120\text{Vcd}$ (arranque a tensión reducida). Mida y registre en la HC los valores indicados en la tabla e.

Tabla e Valores medidos. Operación del motor universal excitado con corriente directa.

τ_m lb·plg	I A	P W	n rpm
0			
3			
6			
9			
12			

Abra el interruptor s, reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor).

Calcule los valores indicados en la tabla f.

Tabla f Valores calculados. Operación del motor universal excitado con corriente directa.

τ_m lb·plg	P_m W	η %	R_{motor} Ω
0			
3			
.			
12			

Observación:

6 La velocidad del motor se disminuye considerablemente al aumentar la carga tanto en corriente alterna como en corriente directa.

7 Si el motor de corriente directa serie utilizado en el **complemento: Práctica 3 Tema 2** fuera conectado a una fuente de corriente alterna de 120Vca, arrancaría y operaría, pero no tan bien como con una fuente de corriente directa. Esto se explica por el hecho de que algunos factores que no tienen ningún efecto sobre la operación de corriente directa, son significantes durante la operación de corriente alterna. La reactancia inductiva del devanado de campo en serie limita la corriente del motor a un valor comparativamente inferior. Por consecuencia, se desarrolla una pequeña potencia. Los polos inductores de hierro spolido producen pérdidas a causa de histéresis y corrientes parásitas de Foucault debido a las alternaciones del flujo magnético en el estator. La conmutación es menos satisfactoria y se reduce la duración de las escobillas por la acción del transformador, entre los devanados principales del campo y los devanados cortocircuitados que se

están conmutando. El motor universal es una modificación del motor de corriente directa serie. El reduce los factores limitadores, y opera eficazmente en corriente alterna y en corriente directa.

Use la HC proponer el dato placa (tabla g).

Tabla g Dato de placa propuesto. Motor universal excitado con corriente directa.

E (V)	I (A)	P _m (W)	n (rpm)	CA/CC

Compare las tablas b y c (motor universal excitado con corriente alterna) con las tablas e y f (motor universal excitado con corriente alterna).

Objetivo 2

b1) Motor universal excitado con corriente alterna. Use el **complemento: Reto 3** para graficar la característica mecánica n vs τ_m , y las características electromecánicas f_p vs P_m , η vs P_m , I vs P_m y n vs P_m . Muestre los comportamientos en las figuras e, f, g, h e i.

insertar figura

Figura e Característica mecánica n vs τ_m . Corriente alterna.
Motor universal.

insertar figura

Figura f Característica electromecánica f_p vs P_m . Corriente alterna.
Motor universal.

insertar figura

Figura g Característica electromecánica η vs P_m . Corriente alterna.
Motor universal.

insertar figura

Figura h Característica electromecánica I vs P_m . Corriente alterna.
Motor universal.

insertar figura

Figura i Característica electromecánica n vs P_m . Corriente alterna.
Motor universal.

b1) Motor universal excitado con corriente directa. Use el **complemento: Reto 3** para graficar la característica mecánica n vs τ_m , y las características electromecánicas η vs P_m , I vs P_m y n vs P_m . Muestre los comportamientos en las figuras j, k, l e m.

insertar figura

Figura **j** Característica mecánica n vs τ_m . Corriente directa.
Motor universal.

insertar figura

Figura **k** Característica electromecánica η vs P_m . Corriente directa.
Motor universal.

insertar figura

Figura **l** Característica electromecánica I vs P_m . Corriente directa.
Motor universal.

insertar figura

Figura **m** Característica electromecánica n vs P_m . Corriente directa.
Motor universal.

Objetivo 3

Observación:

8 Para las metodologías “c1)” y “c2)”. Recuerde que debe tener las mismas conexiones de los devanados de armadura y compensación que en la metodología “3)”.

c1) Motor universal excitado con corriente alterna. Use el circuito de la figura **c**. Dele toda la vuelta a la perilla de control del electrodinamómetro haciéndola girar en sentido de las manecillas del reloj para proporcionarle al motor universal excitado con corriente alterna la carga máxima. Conecte el electrodinamómetro. Cierre el interruptor s y ajuste la tensión hasta que $E = 30Vca$. Mida la $I_{arranque\ motor}$ el τ_m arranque y registre los valores en la tabla **h**.

Tabla **h** Valor medido. Corriente de arranque y par mecánico de arranque del motor universal excitado con corriente alterna.

$I_{arranque\ motor}$ A	τ_m arranque lb·plg

Abra el interruptor s , reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor).

c2) Motor universal excitado con corriente directa. Use el circuito de la figura **d**. Dele toda la vuelta a la perilla de control del electrodinamómetro haciéndola girar en sentido de las manecillas del reloj para proporcionarle al motor universal excitado con corriente alterna la carga máxima. Conecte el electrodinamómetro. Cierre el interruptor s y ajuste la tensión hasta que $E = 30Vcd$. Mida la $I_{arranque\ motor}$ el τ_m arranque y registre los valores en la tabla **i**.

Tabla **i** Valor medido. Corriente de arranque y par mecánico de arranque del motor universal excitado con corriente directa.

$I_{arranque\ motor}$	τ_m arranque

A	lb _r plg

Abra el interruptor s, reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor).

Explique los resultados de las tablas **h** e **i**.

Objetivo 4

d) Operación no compensada. Elimine el devanado de compensación conectando el circuito como se muestra en la figura **n**.

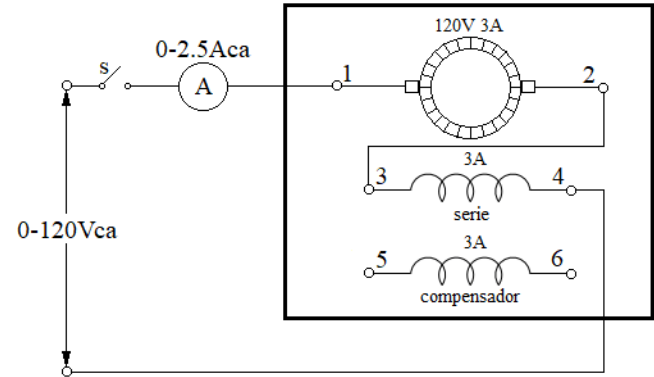


Figura **n** Operación no compensada.

Dele toda la vuelta a la perilla de control del electrodinamómetro haciéndola girar en sentido contrario al de las manecillas del reloj para proporcionarle al “motor serie” excitado con corriente alterna la carga mínima. Conecte el electrodinamómetro. Cierre el interruptor **s** y ajuste la tensión hasta que $E = 120\text{Vcd}$ (arranque a tensión reducida). Aumente lentamente la carga en el electrodinamómetro hasta que el par sea de 3 lb_rplg. Mida y registre en la tabla **j** la corriente del motor y su velocidad.

Tabla **j** Valores medidos. Corriente del motor y su velocidad.

I	n
A	rpm

P1 ¿Se produce chisporrotéo?

Compare el resultado de la tabla **j** con el que se obtuvo en la tabla **b** para el par de 3 lb_rplg.

Abra el interruptor s, reduzca a cero el voltaje de la fuente de alimentación y desconecte la fuente de alimentación (mediante su interruptor). Desconecte el circuito de la fuente de alimentación y desconecte el electrodinamómetro.

Sugerencias didácticas:

Construir el **complemento: Reto 3** para determinar el dato de placa y las características electromecánicas es importante porque permite comprender como opera el motor universal. La herramienta computacional ofrece resultados al instante (cálculos y gráficas), permitiendo discutir con el alumno para que se apodere del conocimiento.

Reporte del equipo:

Ver la rúbrica para evaluar prácticas de laboratorio.

Referencias:

**Diseño del complemento:
Práctica 3**

“Tema 5” de la asignatura **“Máquinas Eléctricas”**

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Experimento de laboratorio No. 36 “El motor universal, parte I”

Experimento de laboratorio No. 37 “El motor universal, parte II”

Experimentos base para el diseño del complemento: Práctica 3

EXPERIMENTOS CON EQUIPO ELÉCTRICO

Theodore Wildi, Michael J. De Vito

Editorial Limusa, México. 1975

Lab-Volt, Sistemas Educativos

Práctica 4

Control del motor de pasos

Objetivos:

- 1 Controlar la velocidad de giro de un motor de pasos.
- 2 Invertir la dirección de rotación del motor de pasos.

Material y equipo necesario:

- 1 Arduino UNO
- 1 Driver ULN2003
- 1 Motor paso a paso de 4 fases
- 5 Led azul
- 1 Led rojo
- 1 Pot 1K
- 2 Push botton de 6 pines con bloque pulsador enclavado
- 2 Resistencia de carbón 1K, 1/4W
- 6 Resistencia de carbón 100Ω, 1/4W
- Cables

Metodología:

La figura [a](#) muestra un motor paso a paso de 4 fases y tiene acoplado un imán de neodimio en su eje. Este dispositivo es parte del prototipo “generador elemental de corriente alterna trifásico”. El dispositivo mostrado en la figura [a](#) se usa en el **complemento: Práctica 1 Tema 1 Objetivo 5** y en el **complemento: Práctica 1 Tema 3 Objetivo 1**.



Figura [a](#) Motor paso a paso 4 fases.

Objetivo 1

a1) La figura [b](#) muestra el diagrama esquemático propuesto para controlar la velocidad y el sentido de rotación del motor paso a paso mediante el driver ULN2003 y ARDUINO UNO.

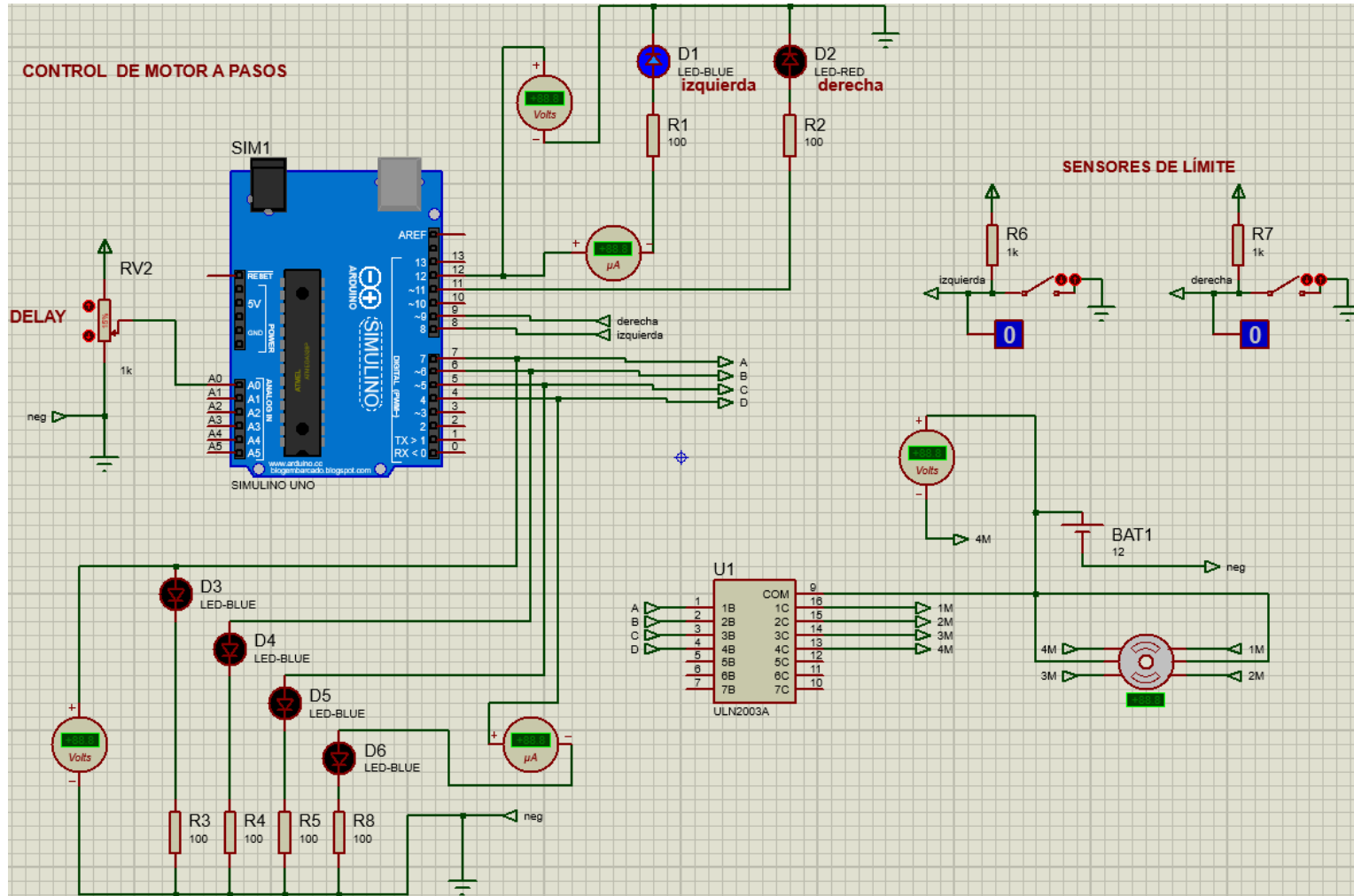


Figura b Diagrama esquemático. Circuito para controlar la velocidad y el sentido de rotación del motor paso a paso.

Diseñe un programa para usar el circuito mostrado en la figura b.

Programa propuesto:

a2) Construya el circuito. Ponga en marcha el control y verifique su funcionamiento. Muestre en la figura c el control del motor paso a paso.

insertar figura

Figura c Control del motor paso a paso.

Objetivo 2

b) Use el control de motor paso a paso y cambie el sentido de rotación del motor paso a paso.

Sugerencias didácticas:

No hay.

Reporte del equipo:

Ver la rúbrica para evaluar prácticas de laboratorio.

Referencia:

Diseño del complemento:

Práctica 4

“Tema 5” de la asignatura **“Máquinas Eléctricas”**

M. C. José Alejandro Morones Alba

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2025

Anexo

Solución de las prácticas de laboratorio

Práctica 1

Determinación del dato de placa del motor de inducción con condensador de arranque y características electromecánicas

Discusión de resultados:

Experimento inicial:

El motor monofásico de fase hendida

a1)

Tabla a Valores medidos y calculados. $E = 20V \angle 0^\circ$. Cálculo de los parámetros del devanado principal.

I_p A	P_p W	Q_p var	R_p Ω	X_p Ω
2.5	27	42	4.32	6.72

Tabla b Valores medidos y calculados. $E = 20V \angle 0^\circ$. Cálculo de los parámetros del devanado auxiliar.

I_a A	P_a W	Q_a var	R_a Ω	X_a Ω
2	36	17	9	4.25

a2)

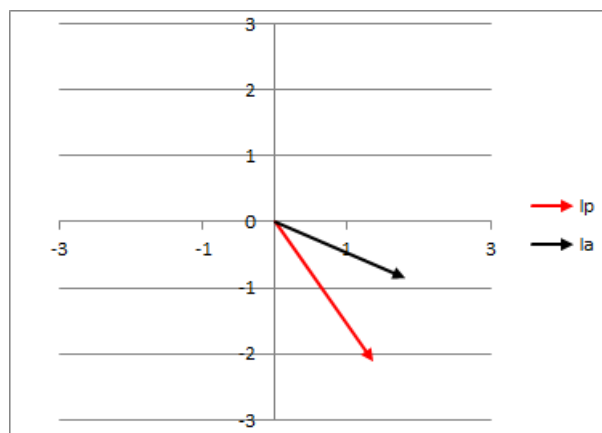


Figura b Diagrama fasorial. Corriente por el devanado principal y corriente por el devanado auxiliar. Motor monofásico de fase hendida.

Tabla c Valor calculado. Ángulo de defasamiento entre la corriente por el devanado principal y la corriente por el devanado auxiliar. Motor monofásico de fase hendida.

$\angle$ de defasamiento entre corrientes ($^\circ$)
31.987

Tabla d Magnitudes y ángulos de los fasores I_p e I_a . Motor monofásico de fase hendida.

I_p		I_a	
I_p	$^\circ$	I_a	$^\circ$
2.503	-57.264	2.009	-25.277

Objetivo 2

b)

Tabla e Valor medido. Tensión de la fase R al neutro (tensión de fase).

E_{R-N} V
127

Tabla f Valor medido. Corriente de arranque del devanado principal.

$I_{\text{arranque p}}$ A
18

P1 ¿El motor produjo ruido? **Si.** **P2** ¿Giró el rotor? **No.**

Baje la parte delantera del módulo y, con cuidado, dele una vuelta rápida al eje del rotor en el momento en que se cierra el interruptor s, **P3** ¿Giró el motor? **Si.** **P4** ¿Qué determinó el sentido de rotación del motor? **La dirección en la cual el eje del rotor fue girado a mano.**

Tabla g Valor medido. Corriente de arranque del devanado auxiliar del motor monofásico de fase hendida.

$I_{\text{arranque a}}$ A
14

P5 ¿El motor produjo ruido? **Si.** **P6** ¿Giró el rotor? **No.**

Tabla h Valor medido. Corriente de arranque del motor monofásico de fase hendida.

$I_{\text{arranque motor}}$ A
25

P7 ¿Arrancó el motor? **Si.** **P8** ¿Produjo mucho ruido el motor? **Si.**

P9 ¿El sentido de rotación es hacia la izquierda o hacia la derecha? **Hacia la derecha.**

Intercambie los cables que van al devanado auxiliar y cierre el interruptor s durante un lapso no mayor de 2 segundos, **P10** ¿El sentido de rotación cambió? **Si.**

Objetivo 3

c1)

Tabla i Valores medidos y calculados. Operación en vacío.

$I_{\text{vacío}}$ A	$P_{\text{vacío}}$ W	$Q_{\text{vacío}}$ var	$n_{\text{vacío}}$ rpm	$R_{\text{motor vacío}}$ Ω	$X_{\text{motor vacío}}$ Ω
3.25	105	375	1790	9.940	35.502

P11 ¿Se puso en marcha el motor? **Si.**

P12 ¿Funcionó el interruptor centrífugo? **Si.**

P13 ¿Cuál es su estimación con relación al tiempo de arranque? **1s.**

c2)

Tabla j Valor calculado. Par nominal del motor monofásico de fase hendida.

τ_m nominal lb _r plg
8.624

Tabla k Valores medidos y calculados. Operación a plena carga.

I_{nominal} A	P_{nominal} W	Q_{nominal} var	n_{nominal} rpm	$R_{\text{motor nominal}}$ Ω	$X_{\text{motor nominal}}$ Ω
4.4	374	369	1724	19.318	19.059

Tabla l Valores medidos. Operación del motor monofásico de fase hendida.

τ_m lb _r plg	I A	P W	Q var	n rpm
0	3.25	105	375	1790
3	3.5	240	358	1765
6	3.9	295	365	1745
9	4.4	375	370	1720
12	5.1	474	387	1550

Tabla m Valores calculados. Operación del motor monofásico de fase hendida.

τ_m lb _r plg	S VA	fp	P_m W	η %	R_{motor} Ω	X_{motor} Ω
0	390	0.269	0	0	9.940	35.502
3	420	0.571	62.806	26.169	19.591	29.224
6	468	0.630	124.188	42.097	19.395	23.997
9	528	0.710	183.614	48.963	19.369	19.111
12	612	0.774	220.622	46.544	18.223	14.878

Objetivo 4

c1)

Tabla **n** Valor medido. Par mecánico de arranque del motor monofásico de fase hendida.

τ_m arranque $lb_f \cdot plg$
14

Práctica de laboratorio 1:

Objetivo 1

a)

Tabla **a** Valor medido. Tensión de la fase R al neutro (tensión de fase).

E_{R-N} V
127

Tabla **b** Valor medido. Corriente de arranque del devanado principal.

$I_{\text{arranque p}}$ A
18

Tabla **c** Valor medido. Corriente de arranque del devanado auxiliar del motor con condensador de arranque.

$I_{\text{arranque a}}$ A
9

Tabla **d** Valor medido. Corriente de arranque y par mecánico de arranque del motor con condensador de arranque.

$I_{\text{arranque motor}}$ A	τ_m arranque $lb_f \cdot plg$
17	23.5

Objetivo 2

b)

Tabla **f** Valores medidos. Operación del motor con condensador de arranque.

τ_m $lb_f \cdot plg$	I A	P W	Q var	n rpm
0	3.25	105	375	1790
3	3.5	240	358	1765
6	3.9	295	365	1745
9	4.4	375	370	1720
12	5.1	474	387	1550

Tabla g Valores calculados. Operación del motor con condensador de arranque.

τ_m lb _r plg	S VA	fp	P _m W	η %	R _{motor} Ω	X _{motor} Ω
0	390	0.269	0	0	9.940	35.502
3	420	0.571	62.806	26.169	19.591	29.224
6	468	0.630	124.188	42.097	19.395	23.997
9	528	0.710	183.614	48.963	19.369	19.111
12	612	0.774	220.622	46.544	18.223	14.878

Tabla h Dato de placa propuesto. Motor con condensador de arranque.

E	I	P _m	f	n
V	A	W	Hz	rpm
120	4.4	183.614472	60	1720

Tabla i Comparación del motor monofásico de fase hendida y el motor con condensador de arranque.

Motor:	I _{arranque p} A	I _{arranque a} A	I _{arranque motor} A	τ_m arranque lb _r plg
Monofásico de fase hendida	18	14	25	14
Con condensador de arranque	16	9	17	23.5

P14 ¿Cuántas veces es mayor la corriente de arranque que la corriente nominal para el motor monofásico de fase hendida (utilice la tabla h)? **5.681 veces.**

P15 ¿Cuántas veces es mayor la corriente de arranque que la corriente nominal para el motor con condensador de arranque (utilice la tabla h)? **3.863 veces.**

P16 ¿Cuántas veces es mayor el par de arranque que el par nominal para el motor monofásico de fase hendida? **1.623 veces.**

P17 ¿Cuántas veces es mayor el par de arranque que el par nominal para el motor con condensador de arranque? **2.724 veces.**

Objetivo 3

c)

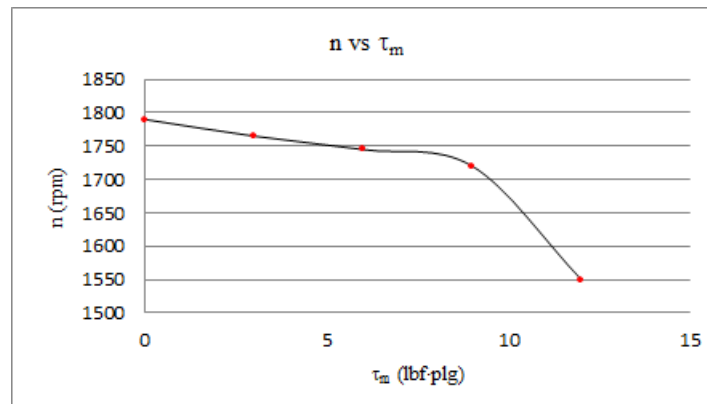


Figura e Característica mecánica n vs τ_m .

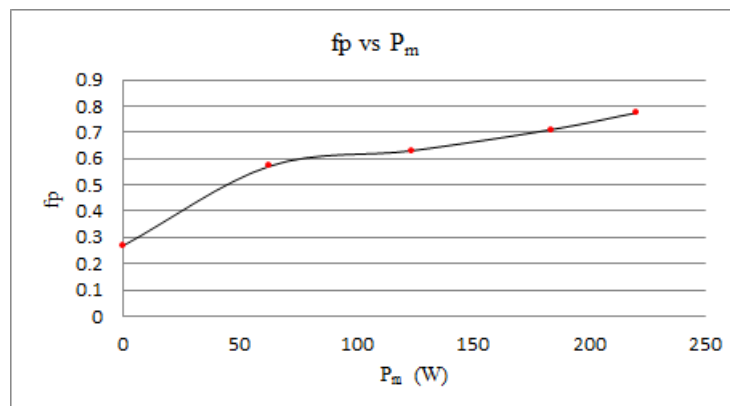


Figura f Característica electromecánica f_p vs P_m .

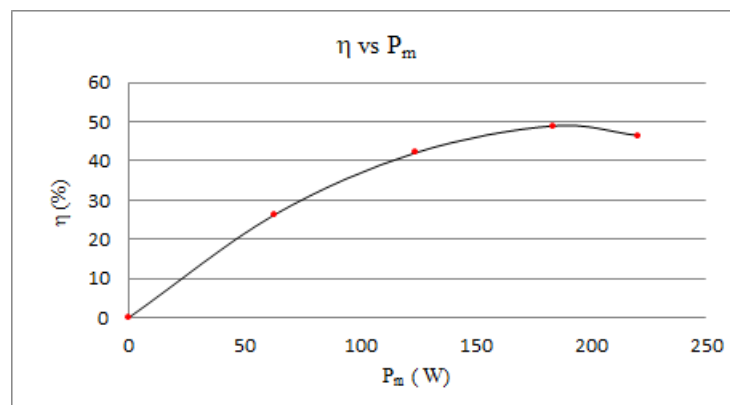


Figura g Característica electromecánica η vs P_m .

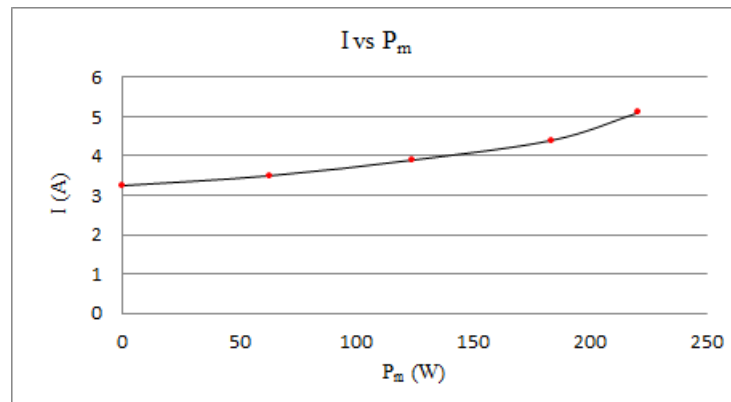


Figura h Característica electromecánica I vs P_m .

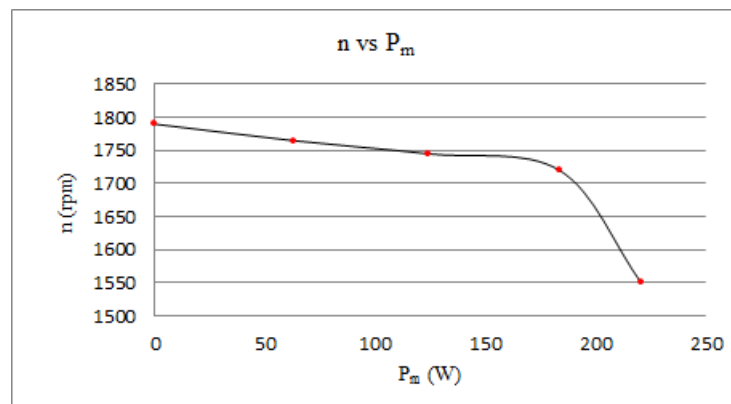


Figura i Característica electromecánica n vs P_m .

Práctica 2

Determinación del dato de placa del motor de inducción con condensador de marcha y características electromecánicas

Discusión de resultados:

Objetivo 1

a1)

Tabla a Valores medidos. I_a , P_a y Q_a . Devanado auxiliar.

I_a (A)	P_a (W)	Q_a (var)
2.3	8	-25

Tabla b Valores calculados. Parámetros del devanado auxiliar.

R_a (Ω)	X_a (Ω)
1.512	-4.725

Tabla c Valores calculados por la HC. I_a , θ_a y f_{p_a} . Devanado auxiliar.

I_a (A)	$\angle I_a$ ($^\circ$)	f_{p_a}
2.418	72.255	0.304

Tabla d Valores calculados por la HC. Flujos de potencia. Devanado auxiliar.

P_a (W)	Q_a (var)	S_a (VA)
8.844	-27.640	29.020

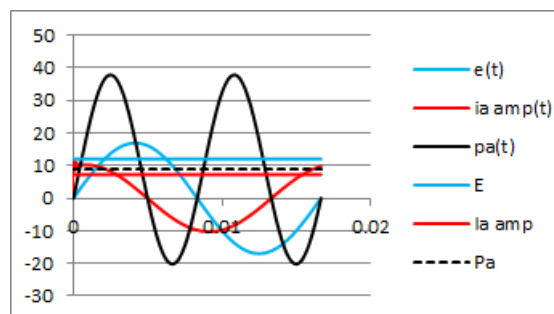


Figura d Gráfico en función del tiempo, $\alpha = 0^\circ$, $t = 0$ s. Factor de amplificación para la corriente = 3. Devanado auxiliar.

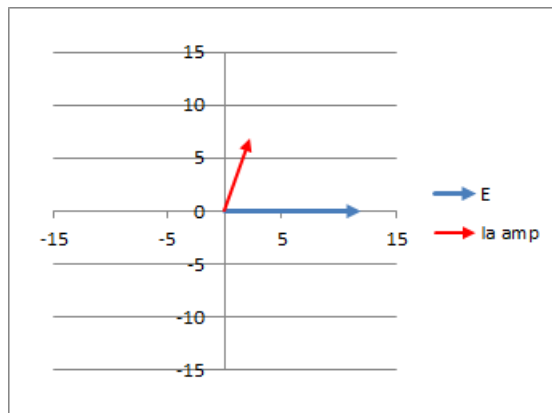


Figura e Diagrama fasorial, $\alpha = 0^\circ$, $t = 0$ s. Factor de ampliación para corriente = 3. Devanado auxiliar.

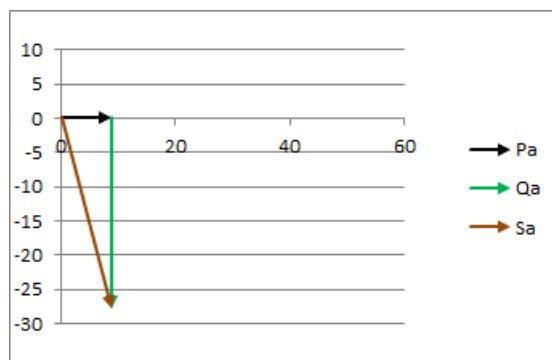


Figura f Triángulo de potencias. Devanado auxiliar.

a2)

Tabla e Valores medidos. I_p , P_p y Q_p . Devanado principal.

I_p (A)	P_p (W)	Q_p (var)
4.2	40	28

Tabla f Valores calculados. Parámetros del devanado principal.

R_p (Ω)	X_p (Ω)
2.267	1.587

Tabla g Valores calculados por la HC. I_p , θ_p y fp_p . Devanado principal.

I_p (A)	$\angle I_p$ ($^\circ$)	fp_p
4.335	-34.992	0.819

Tabla h Valores calculados por la HC. Flujos de potencia. Devanado principal.

P_p (W)	Q_p (var)	S_p (VA)
42.620	29.834	52.024

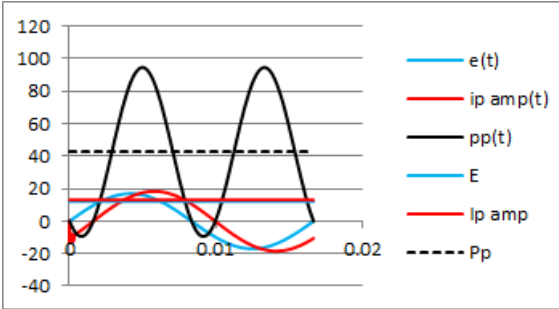


Figura g Gráfico en función del tiempo, $\alpha = 0^\circ$, $t = 0$ s. Factor de ampliación para la corriente = 3. Devanado principal.

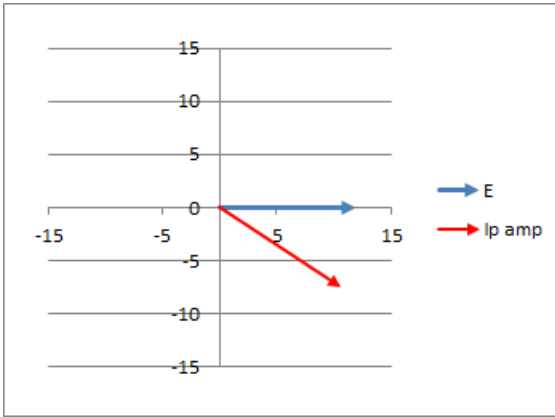


Figura h Diagrama fasorial, $\alpha = 0^\circ$, $t = 0$ s. Factor de ampliación para corriente = 3. Devanado principal.

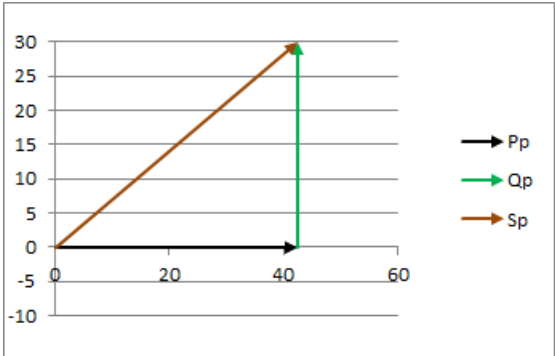


Figura i Triángulo de potencias. Devanado principal.

a3)

Tabla i Valores medidos. I_m , P_m y Q_m . Motor con condensador de marcha.

I_m (A)	P_m (W)	Q_m (var)
4.2	48	3

Tabla j Valores calculados. Motor con condensador de marcha.

$R_m (\Omega)$	$X_m (\Omega)$
2.721	0.170

Introduzca los parámetros del motor con condensador de marcha en la herramienta computacional (HC) y considere que $E = 12 \angle 0^\circ$. Registre los valores indicados en la tabla k y l.

Tabla k Valores calculados por la HC. I_p , θ_p y f_{p_m} . Motor con condensador de marcha.

$I_m (A)$	$\angle I_m (^\circ)$	f_{p_m}
4.401	-3.576	0.998

Tabla l Valores calculados por la HC. Flujos de potencia. Motor con condensador de marcha.

$P_m (W)$	$Q_m (var)$	$S_m (VA)$
52.714	3.294	52.816

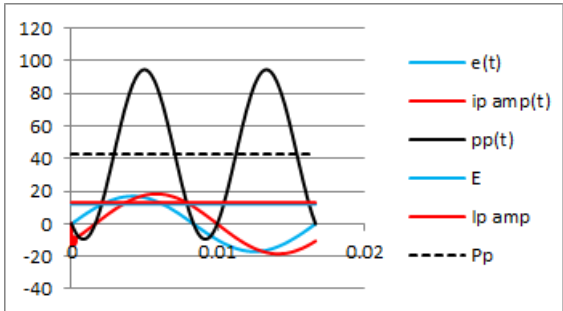


Figura j Gráfico en función del tiempo, $\alpha = 0^\circ$, $t = 0$ s. Factor de ampliación para corriente = 3. Motor con condensador de marcha.

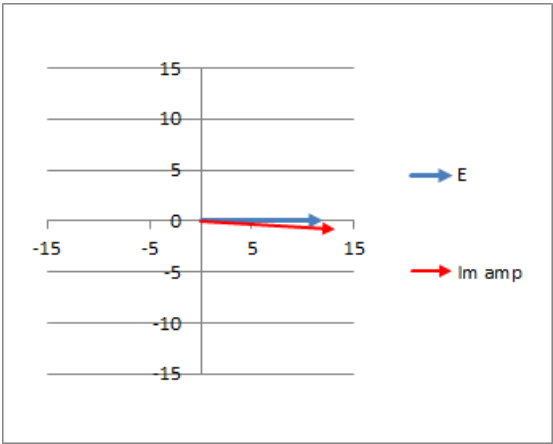


Figura k Diagrama fasorial, $\alpha = 0^\circ$, $t = 0$ s. Factor de ampliación para corriente = 3. Motor con condensador de marcha.

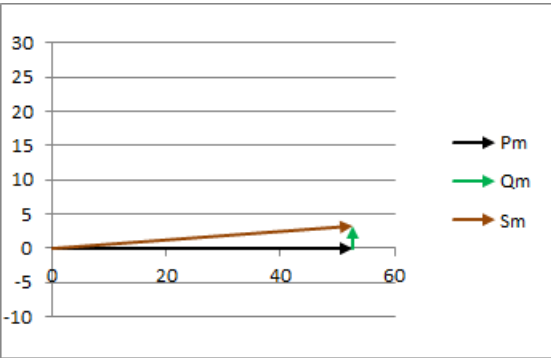


Figura l Triángulo de potencias. Motor con condensador de marcha.

a4)

Tabla m Valor calculado. $I_m = I_p + I_a$.

$I_m = I_p + I_a$	
I_m	$\angle I_m (^{\circ})$
4.292	-2.441

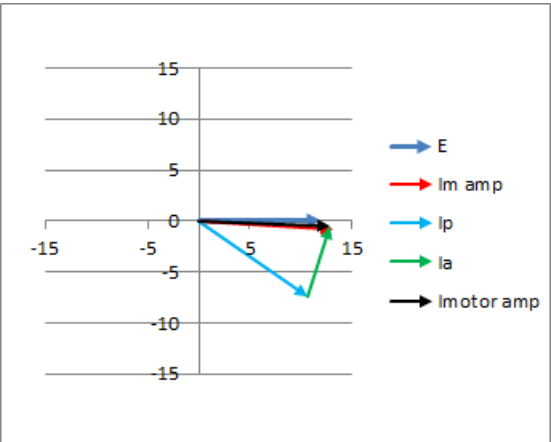


Figura m Diagrama fasorial. Fasores E , I_a (tabla c) sumado con I_p (tabla g), I_m (tabla k) e I_m (tabla m). Factor de amplificación para las corrientes = 1.

Tabla n Valor calculado. Ángulo de defasamiento entre la corriente por el devanado principal I_p y la corriente por el devanado auxiliar I_a . Motor con condensador de marcha.

$\angle$ de defasamiento entre corrientes ($^{\circ}$)
107.247

P1 ¿Se seleccionó cuidadosamente el valor del capacitor? No. El capacitor debe tener una reactancia capacitiva ligeramente más grande para el ángulo tienda a 90° , con un desplazamiento de 107.247° el motor no desarrolla el par máximo.

a5)

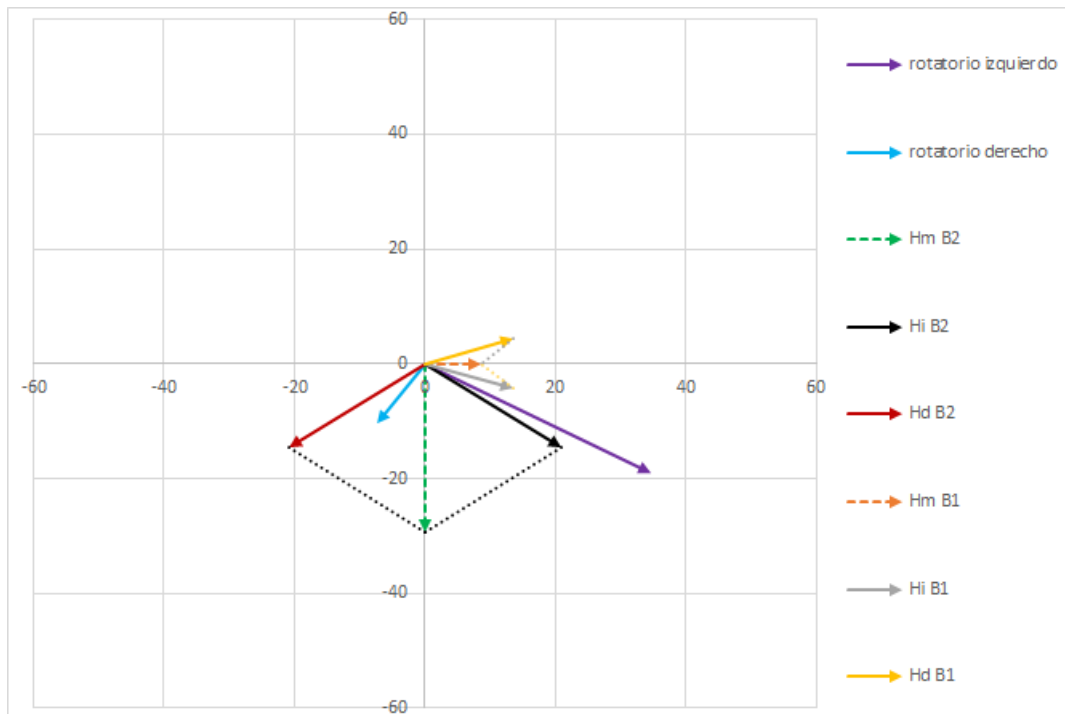


Figura n Campo magnético giratorio, rotación: antihorario, $t = 0$ s.

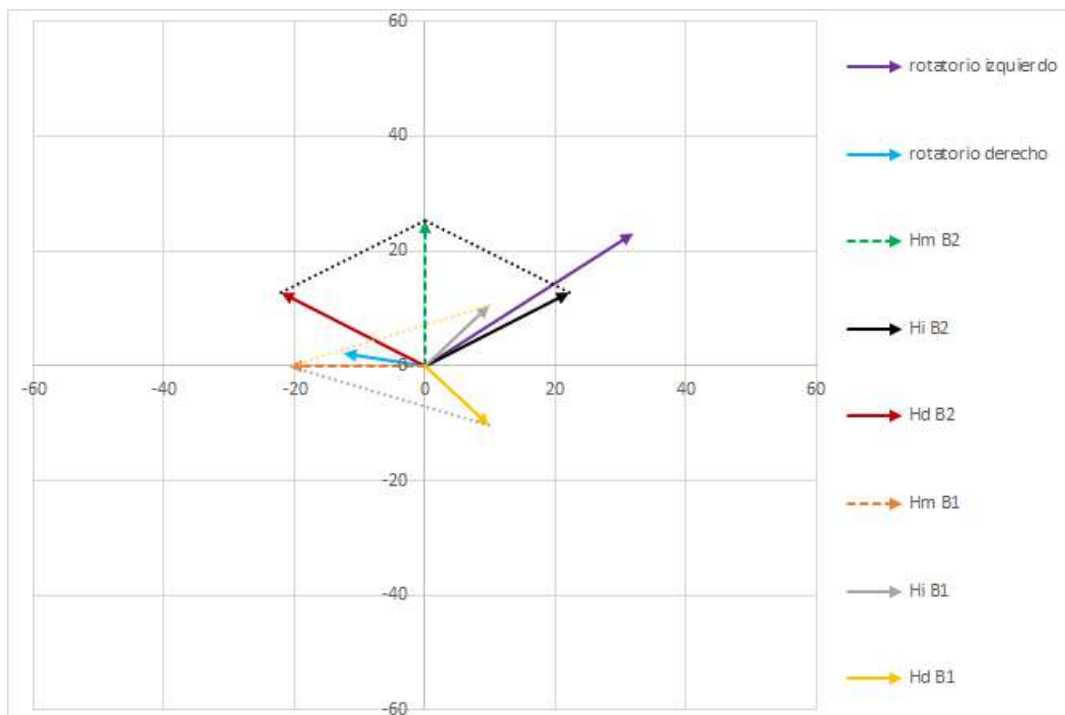


Figura o Campo magnético giratorio, rotación: antihorario, $t = 0.003$ s.

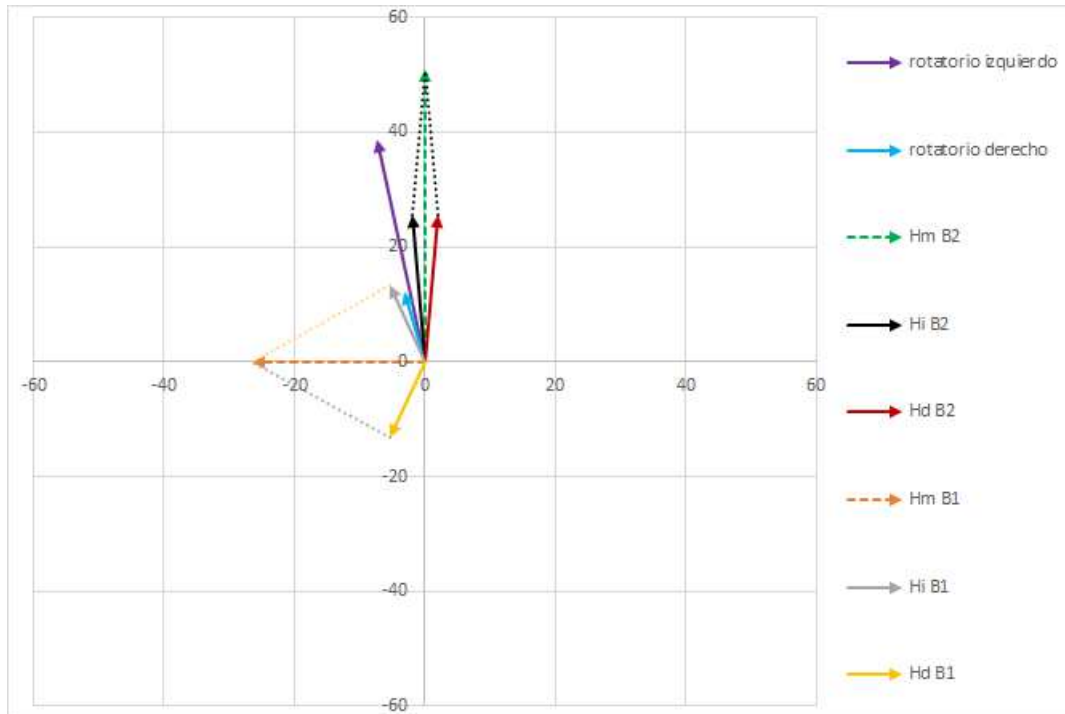


Figura p Campo magnético giratorio, rotación: antihorario, $t = 0.006s$.

P2 ¿Aparece el giratorio derecho? **Si.**

P3 ¿El rotor de la máquina se frena? Explique usando las magnitudes de los giratorios izquierdo y derecho para la figura p (tabla o). **La magnitud del rotatorio derecho no es 0 por lo que el rotor del motor con condensador de marcha se frena. Este rotatorio no es cero debido a que las impedancias del devanado principal y auxiliar son diferentes.**

Tabla o Magnitudes y ángulos de los giratorios izquierdo y derecho.

giratorio izquierdo		giratorio derecho	
magnitud	$\angle^\circ$	magnitud	$\angle^\circ$
39.383	100.766	12.662	104.884

a6)

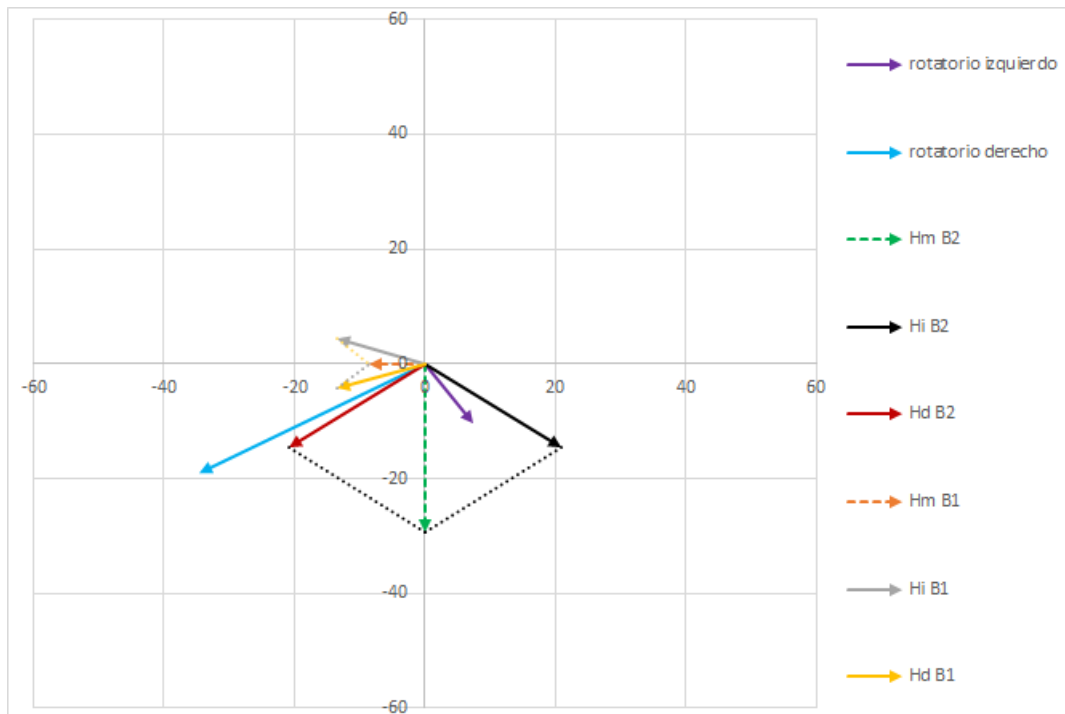


Figura q Campo magnético giratorio, rotación: horario, $t = 0s$.

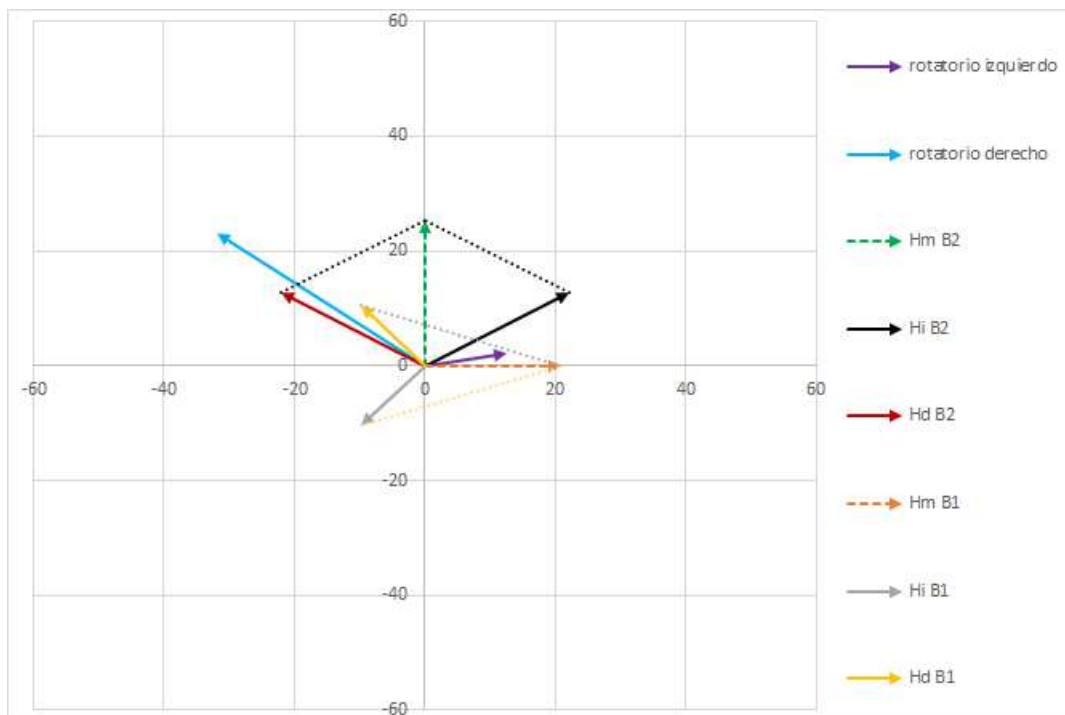


Figura r Campo magnético giratorio, rotación: horario, $t = 0.003s$.

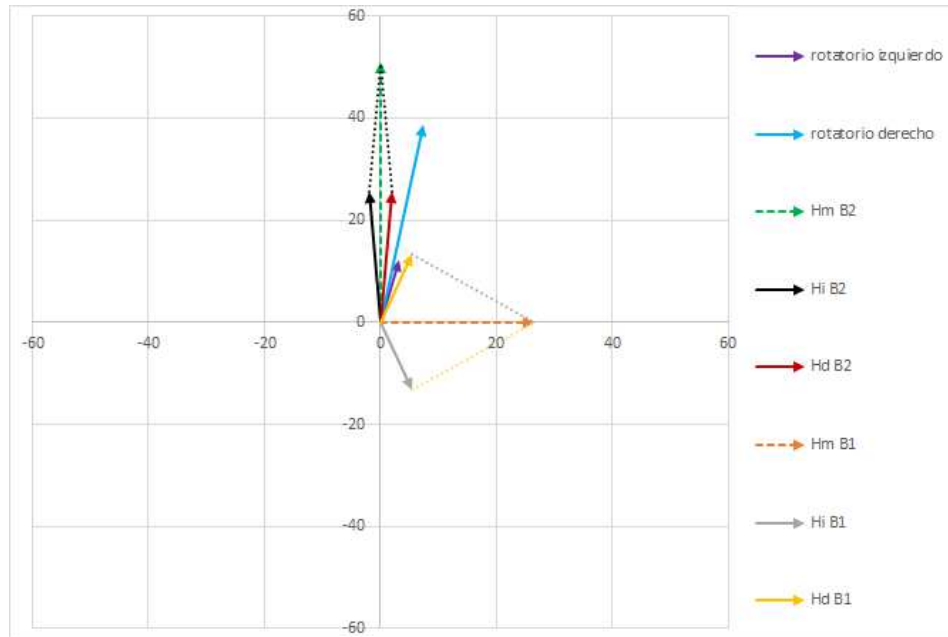


Figura s Campo magnético giratorio, rotación: horario, $t = 0.006s$.

a7) Coloque las bobinas como se muestra en la figura a (la posición física de la bobina 1 con respecto a la bobina 2 es 0°). Conecte al motor con condensador de marcha un interruptor s, y conecte el circuito al transformador. Cierre el interruptor s, **P4** ¿El rotor de la máquina gira? **No.** Se producen 2 campos magnéticos pulsantes, las magnitudes de los giratorios son iguales girando en dirección opuesta.

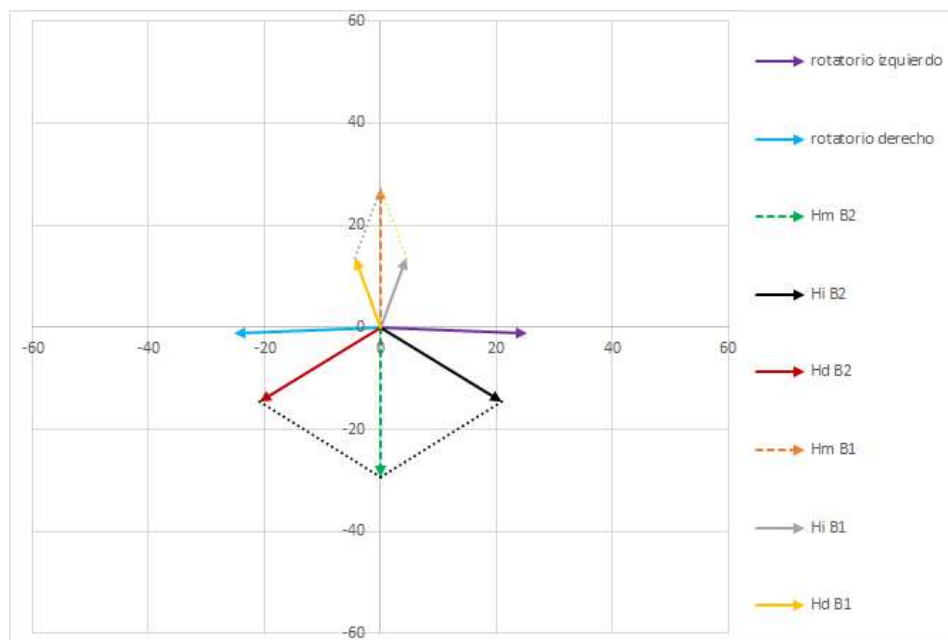


Figura t Campo magnético pulsante, $t = 0s$.

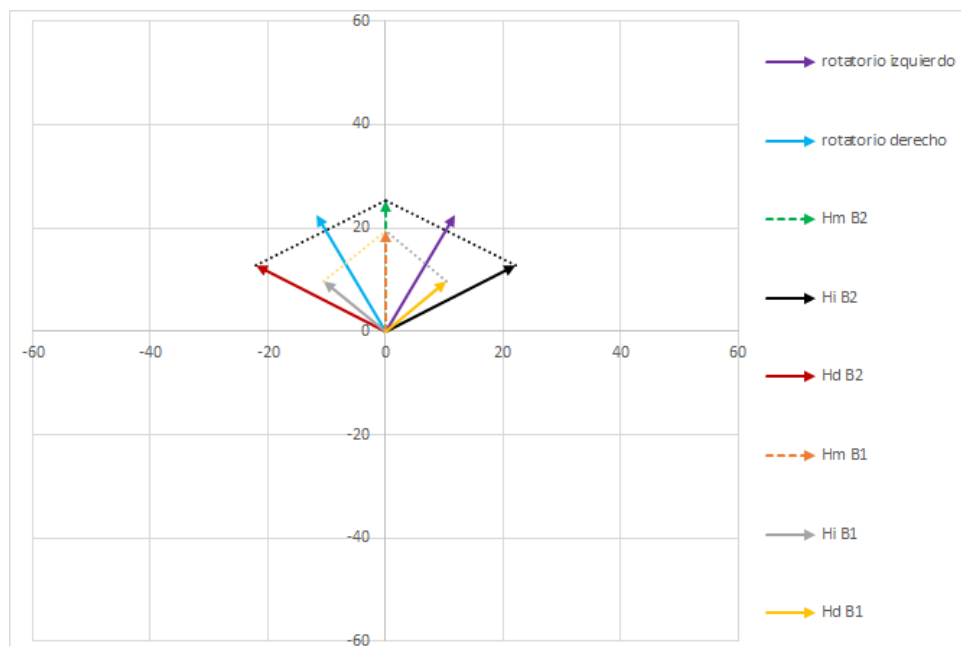


Figura u Campo magnético pulsante, $t = 0.003s$.

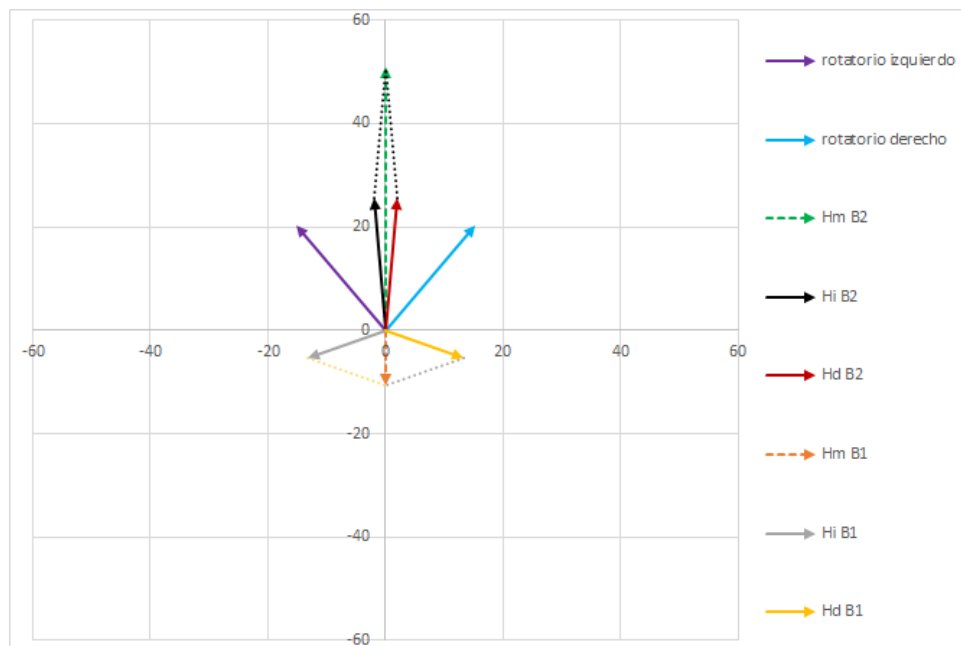


Figura v Campo magnético pulsante, $t = 0.006s$.

a8) Gire la bobina B1 90° en sentido horario. Conecte al motor con condensador de marcha un interruptor s, y conecte el circuito al transformador. Cierre el interruptor s, **P4** ¿El sentido de rotación es horario o antihorario? **Antihorario.**

Objetivo 2

b1)

Tabla q Valor calculado. Par mecánico nominal del motor con condensador de marcha.

τ_m nominal (lb _r plg)
8.624

Tabla r Valores medidos. Operación del motor con condensador de marcha.

τ_m lb _r plg	I A	P W	Q var	n rpm
0	1.23	125	78	1795
3	1.9	210	88	1770
6	2.25	260	72	1750
9	2.75	325	57	1725
12	3.6	425	80	1690

Tabla s Valores calculados. Operación del motor con condensador de marcha.

τ_m lb _r plg	S VA	f _p	P _m W	η %	R _{motor} Ω	X _{motor} Ω
0	147.6	0.846	0	0	82.622	51.556
3	228	0.921	62.984	29.992	58.171	24.376
6	270	0.962	124.544	47.901	51.358	14.222
9	330	0.984	184.148	56.660	42.975	7.537
12	432	0.983	240.549	56.599	32.793	6.172

Tabla t Dato de placa propuesto. Motor con condensador de marcha.

E (V)	I (A)	P _m (W)	f (Hz)	n (rpm)
120	2.75	184.148	60	1725

P5 ¿Es un capacitor electrolítico no polarizado? **No.** Los capacitores electrolíticos no sirven para la operación continua en corrientes altas. Se trata de un capacitor de aceite.

P6 ¿Observó alguna diferencia notable en el nivel de vibración del motor, al cambiar la condición de vacío a la de plena carga? **Si.**

b2)

Tabla u Valor medido. Corriente de arranque y par mecánico de arranque del motor con condensador de marcha.

I _{arranque} motor A	τ_m arranque lb _r plg
8	4

P7 ¿Cuántas veces es mayor la corriente de arranque que la corriente de operación a plena carga (use la tabla t)? **2.909 veces.**

P8 ¿Cómo puede cambiar el sentido de rotación de un motor con condensador de marcha?
Intercambiando los cables de conexión de cualquier devanado.

P9 ¿Por qué se deben usar capacitores es aceite en motores con condensador de marcha, en lugar de emplear capacitores electrolíticos no polarizados? Los capacitores electrolíticos tienen un factor de fuga muy grande y son poco seguros en funcionamiento continua con aplicaciones de corriente alta. Los capacitores en aceite son mucho más estables con un factor de fuga bajo.

Objetivo 3

c)

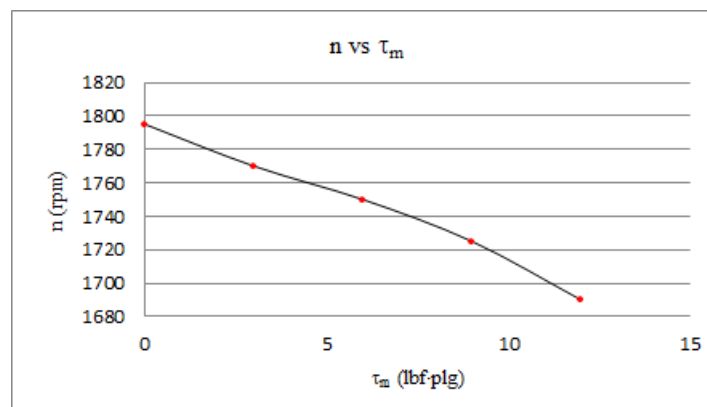


Figura x Característica mecánica n vs τ_m .

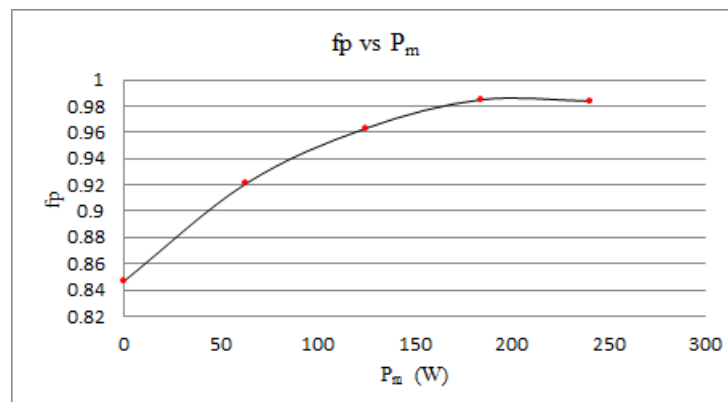


Figura y Característica electromecánica f_p vs P_m .

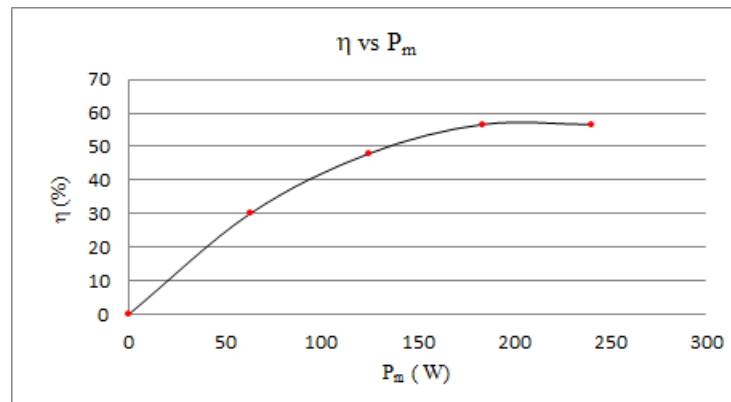


Figura z Característica electromecánica η vs P_m .

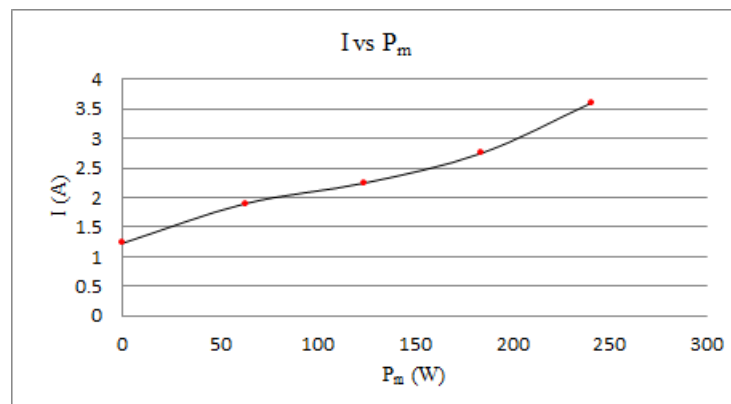


Figura aa Característica electromecánica I vs P_m .

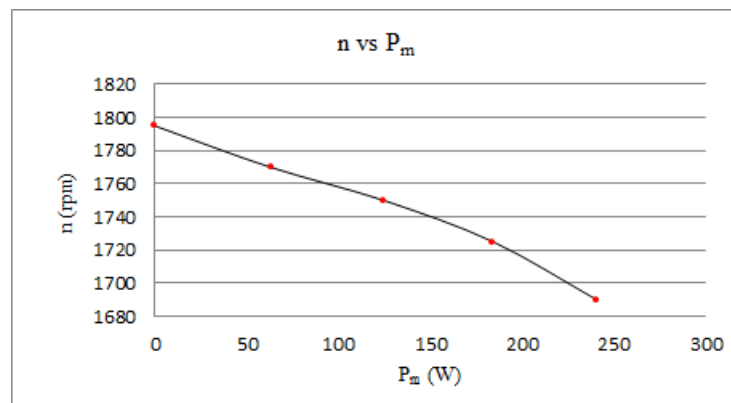


Figura ab Característica electromecánica n vs P_m .

Práctica 3

Determinación del dato de placa del motor universal y características electromecánicas

Discusión de resultados:

1)

Tabla b Valor calculado. Par mecánico nominal del motor universal.

τ_m nominal (lb _f ·plg)
8.217

3)

Tabla a Corriente por el devanado de armadura y el devanado de compensación.
Motor conductivamente compensado.

I _{ca} A
3.5

a1) Motor universal excitado con corriente alterna.

Tabla b Valores medidos. Operación del motor universal excitado con corriente alterna.

τ_m lb _f ·plg	I A	P W	Q var	n rpm
0	1.9	210	88	3450
3	2.3	245	127	2550
6	2.9	290	192	1860
9	3.4	325	246	1400
12	3.9	385	266	1200

Tabla c Valores calculados. Operación del motor universal excitado con corriente alterna.

τ_m lb _f ·plg	S VA	fp	P _m W	η %	R _{motor} Ω	X _{motor} Ω
0	228	0.921	0	0	58.171	24.376
3	276	0.887	90.739	37.0366	46.313	24.007
6	348	0.833	132.373	45.645	34.482	22.829
9	408	0.796	149.453	45.985	28.114	21.280
12	468	0.822	170.804	44.364	25.312	17.488

Tabla d Dato de placa propuesto. Motor universal excitado con corriente alterna.

E (V)	I (A)	P _m (W)	n (rpm)	CA/CC
120	3.4	149.453	1400	

a2) Motor universal excitado con corriente directa.

Tabla e Valores medidos. Operación del motor universal excitado con corriente directa.

τ_m lbf·plg	I A	P W	n rpm
0	1.7	240	4150
3	2	290	3300
6	2.5	350	2600
9	2.9	400	2200
12	3.4	450	1800

Tabla f Valores calculados. Operación del motor universal excitado con corriente directa.

τ_m lbf·plg	P_m W	η %	R_{motor} Ω
0	0	0	83.044
3	117.427	40.492	72.5
6	185.037	52.867	56
9	234.855	58.713	47.562
12	256.206	56.934	38.927

Tabla g Dato de placa propuesto. Motor universal excitado con corriente directa.

E (V)	I (A)	P_m (W)	n (rpm)
120	2.9	234.85572	2200

Compare las tablas b y c (motor universal excitado con corriente alterna) con las tablas e y f (motor universal excitado con corriente alterna). Cuando el motor universal opera con corriente directa la eficiencia es más alta, la potencia mecánica suministrada es más alta, la velocidad es más alta pero la corriente que el motor demanda es más baja debido a que la resistencia es más alta.

Objetivo 2

b1) Motor universal excitado con corriente alterna.

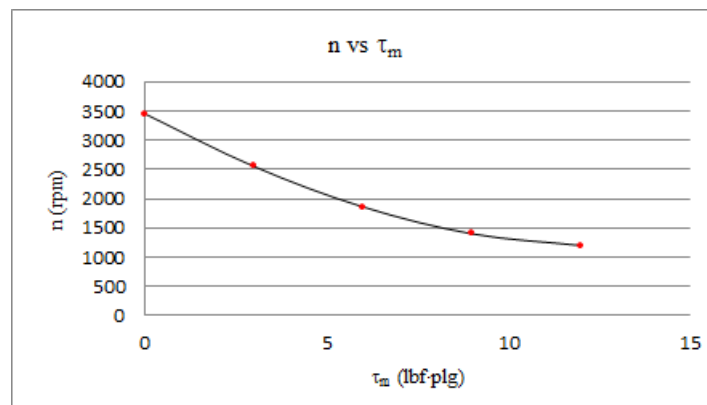


Figura e Característica mecánica n vs τ_m . Corriente alterna.
Motor universal.

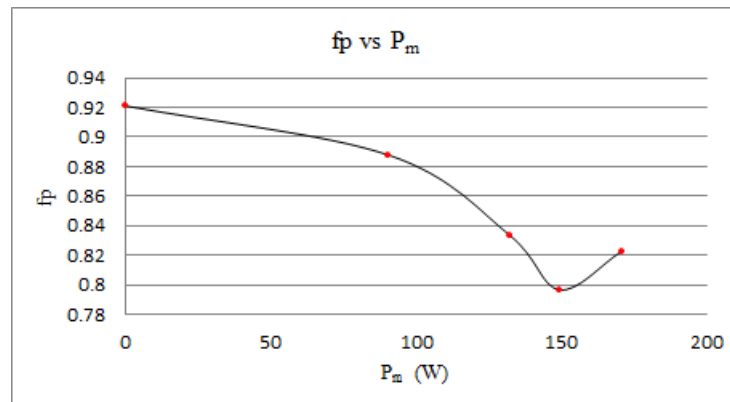


Figura f Característica electromecánica f_p vs P_m . Corriente alterna. Motor universal.

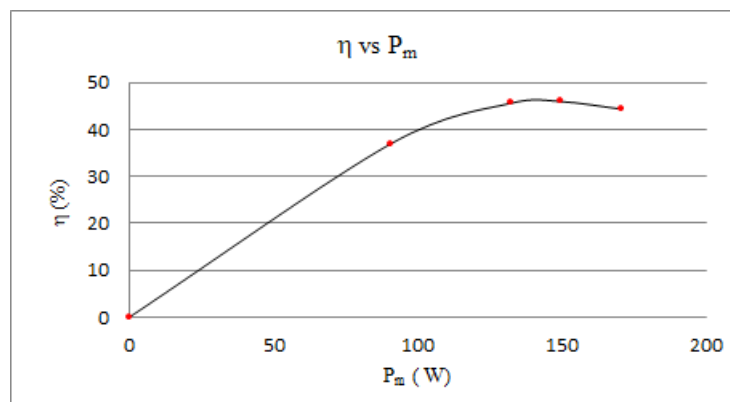


Figura g Característica electromecánica η vs P_m . Corriente alterna. Motor universal.

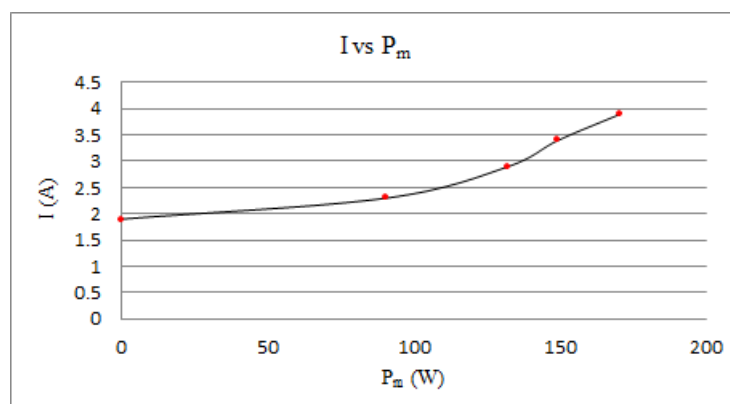


Figura h Característica electromecánica I vs P_m . Corriente alterna. Motor universal.

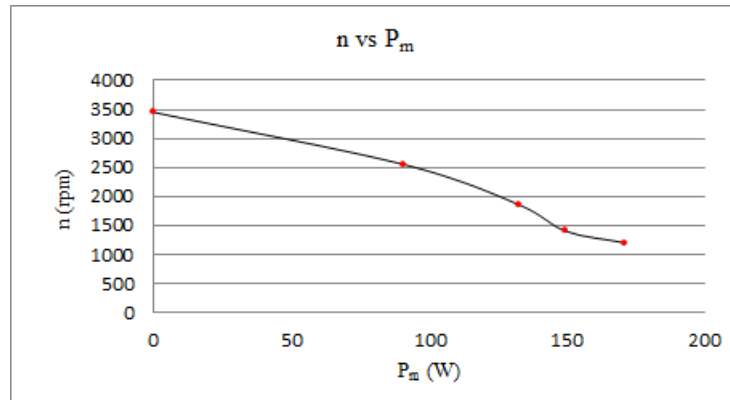


Figura i Característica electromecánica n vs P_m . Corriente alterna.
Motor universal.

b1) Motor universal excitado con corriente directa.

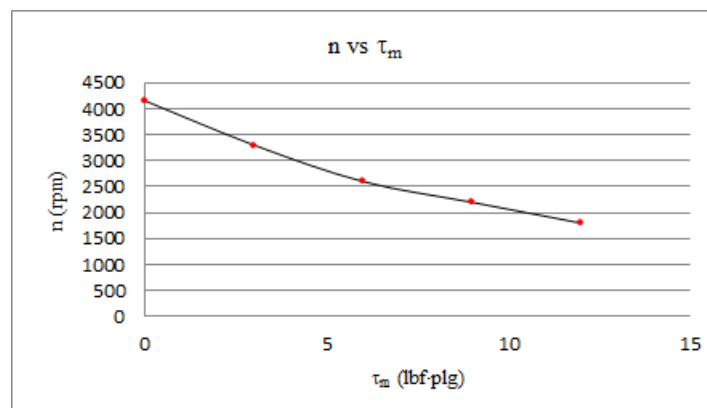


Figura j Característica mecánica n vs τ_m . Corriente directa.
Motor universal.

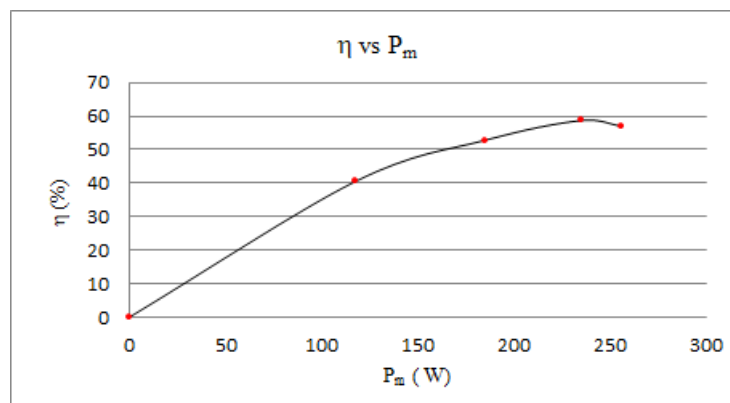


Figura k Característica electromecánica η vs P_m . Corriente directa.
Motor universal.

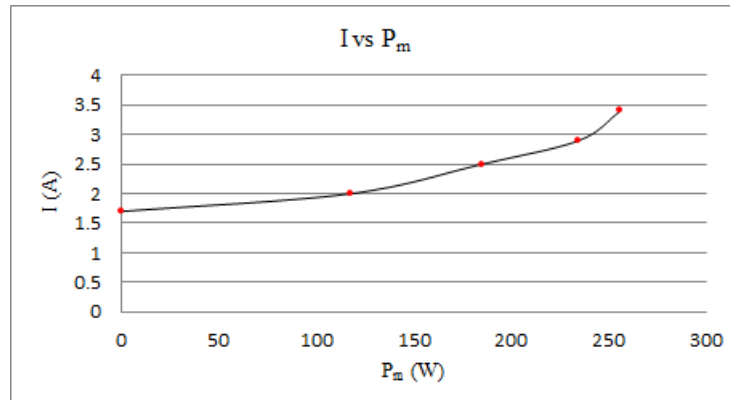


Figura l Característica electromecánica I vs P_m. Corriente directa.
Motor universal.

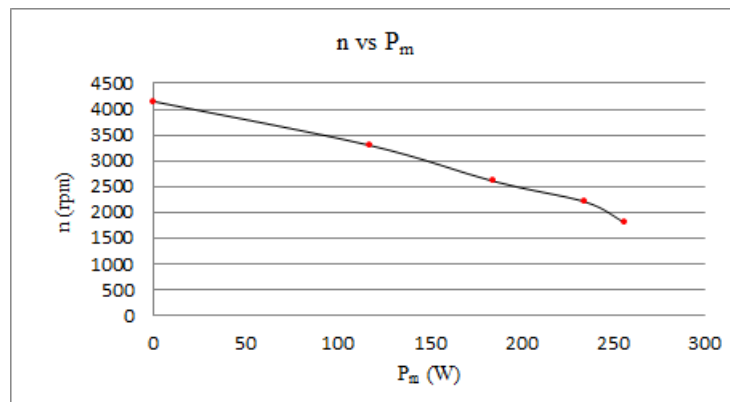


Figura m Característica electromecánica n vs P_m. Corriente directa.
Motor universal.

Objetivo 3

c1) Motor universal excitado con corriente alterna.

Tabla h Valor medido. Corriente de arranque y par mecánico de arranque del motor universal excitado con corriente alterna.

I _{arranque motor} A	τ _{m arranque} lb·plg
1.4	1.6

c2) Motor universal excitado con corriente directa.

Tabla i Valor medido. Corriente de arranque y par mecánico de arranque del motor universal excitado con corriente directa.

I _{arranque motor} A	τ _{m arranque} lb·plg
3.7	16

Explique los resultados de las tablas **h** e **i**. La reactancia inductiva de los devanados de la armadura, campo serie y compensador limita la corriente del motor durante la operación en corriente alterna. Esto reduce el par de arranque de corriente alterna considerablemente menor que el par de arranque de corriente directa.

Objetivo 4

d) Operación no compensada.

Tabla **j** Valores medidos. Corriente del motor y su velocidad.

I A	n rpm
2.4	1230

P1 ¿Se produce chisporroteo? **Si**.

Compare el resultado de la tabla **j** con el que se obtuvo en la tabla **b** para el par de 3 lb_r-plg. La corriente es más o menos la misma, pero la velocidad es considerablemente menor. Sin el devanado compensador el motor produce menos potencia y hay más chisporroteo en las escobillas.

Práctica 4

Control del motor de pasos

Discusión de resultados:

Objetivo 1

a1)

Programa propuesto para el motor paso a paso de 4 fases:

```
//CONTROL DE MOTOR PASO A PASO

int giro_izquierda=9,giro_derecha=8;
int A=4,B=5,C=6,D=7;
int led_azul=12,led_rojo=11;
int velocidad;

void setup() {
  pinMode(A,OUTPUT); pinMode(B,OUTPUT);
  pinMode(C,OUTPUT); pinMode(D,OUTPUT);
  pinMode(giro_izquierda,INPUT);
  pinMode(giro_derecha,INPUT);
  pinMode(led_azul,OUTPUT); pinMode(led_rojo,OUTPUT);
}

void leer_retardo()
{
  velocidad=analogRead(A0);velocidad=velocidad/1;
}

void paso1()
{digitalWrite(A,HIGH);digitalWrite(B,LOW);
digitalWrite(C,LOW);digitalWrite(D,LOW);
delay(velocidad);
}

void paso2()
{digitalWrite(A,LOW);digitalWrite(B,HIGH);
digitalWrite(C,LOW);digitalWrite(D,LOW);
delay(velocidad);
}

void paso3()
{digitalWrite(A,LOW);digitalWrite(B,LOW);
digitalWrite(C,HIGH);digitalWrite(D,LOW);
delay(velocidad);
}
```

```
void paso4()
{digitalWrite(A,LOW);digitalWrite(B,LOW);
digitalWrite(C,LOW);digitalWrite(D,HIGH);
delay(velocidad);
}

void motor_derecha()
{paso1();paso2();paso3();paso4();}

void motor_izquierda()
{paso4();paso3();paso2();paso1();}

void motor_apagado()
{digitalWrite(A,LOW);digitalWrite(B,LOW);
digitalWrite(C,LOW);digitalWrite(D,LOW);}

void uno()
{digitalWrite(led_azul,HIGH);digitalWrite(led_rojo,LOW);
}

void dos()
{digitalWrite(led_azul,LOW);digitalWrite(led_rojo,HIGH);
}

void loop()
{
  if((digitalRead(giro_derecha)))
    {motor_derecha();uno();}
  if(!digitalRead(giro_derecha))
    {motor_apagado();}
    ////////////////////////////////////
  if((digitalRead(giro_izquierda)))
    {motor_izquierda();dos();}
  if(!digitalRead(giro_izquierda))
    {motor_apagado();}
  leer_retardo();
}
```

a2) Construya el circuito. Ponga en marcha el control y verifique su funcionamiento. Muestre en la figura **c** el control del motor paso a paso.

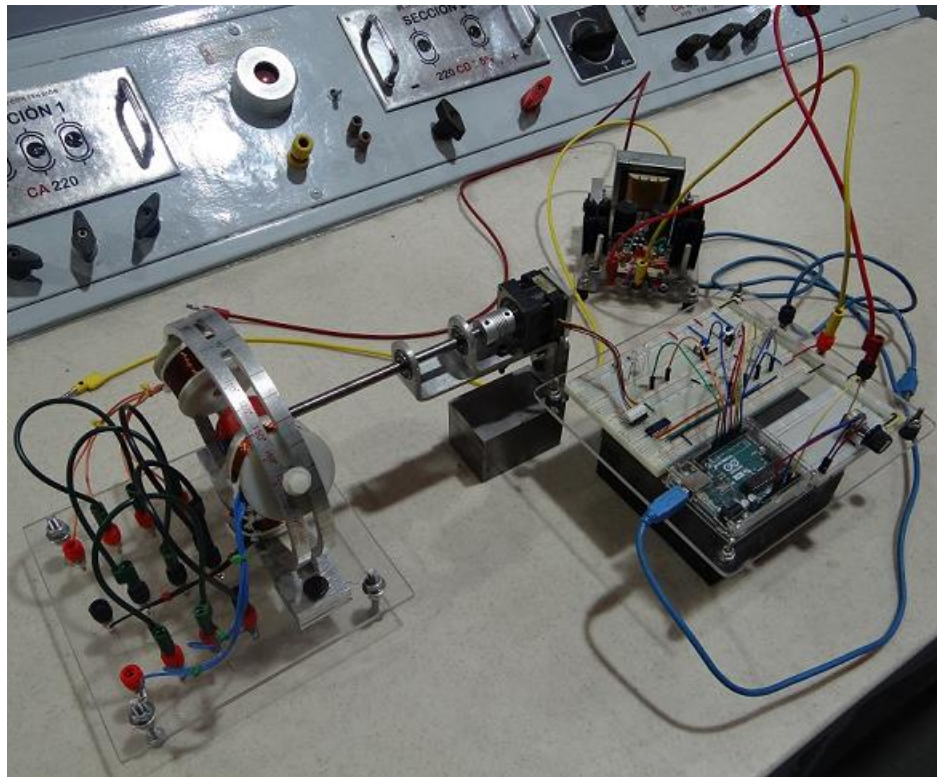
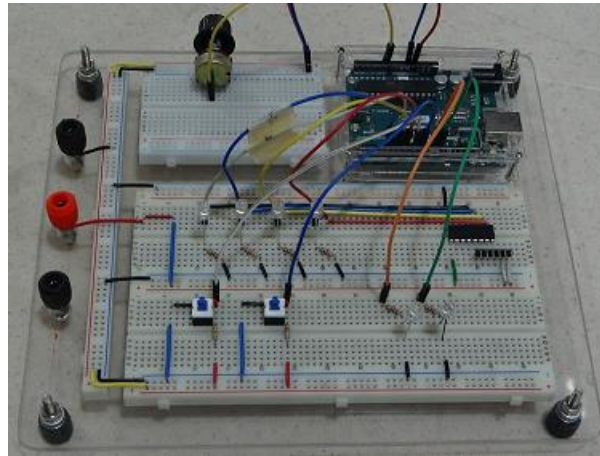


Figura c Control del motor paso a paso de 4 fases.

Apéndice A Sistema Internacional de medidas (SI)

Las unidades de las cantidades aquí citadas corresponden al sistema internacional de medidas (SI).

Las unidades básicas del SI son:

Cantidad	Unidad SI	
	Nombre	Símbolo
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Corriente eléctrica	ampere	A
Temperatura termodinámica	kelvin	K
Cantidad de sustancia	mol	mol
Intensidad luminosa	candela	cd

Prefijos SI

Múltiplo	Prefijo	Símbolo
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	mili	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f

Cantidades derivadas

Cantidad	Símbolo	Unidad	Abreviatura
Admitancia	Y	mhos	$\mathcal{U}$
Capacitancia	C	farad	F
Carga	Q, q	coulomb	C
Conductancia	G	mhos	$\mathcal{U}$
Conductividad	σ	mhos/metro	$\mathcal{U}/m$
Constante de atenuación	α	neper/metro	Np/m
Constante de fase	β	radián/metro	rad/m
Permitividad	ϵ, ϵ_0	farad/metro	F/m
Constante dieléctrica (permitividad relativa)	ϵ_r	(sin dimensiones)	—
Constante de propagación	γ	metro ⁻¹	m ⁻¹
Densidad de carga (lineal)	ρ_L	coulomb/metro	C/m
Densidad de carga (superficie)	ρ_s	coulomb/metro ²	C/m ²
Densidad de carga (volumen)	ρ_v	coulomb/metro ³	C/m ³
Densidad de corriente (superficie)	$\vec{K}$	ampere/metro	A/m
Densidad de corriente (volumen)	$\vec{j}$	ampere/metro ²	A/m ²
Densidad de energía	w	joule/metro ³	J/m ³
Densidad de flujo magnético	$\vec{B}$	tesla	T
Desplazamiento eléctrico (densidad de flujo eléctrico)	$\vec{D}$	coulomb/metro ²	C/m ²
Directividad	D	(sin dimensiones)	—
Energía (trabajo)	W	joule	J
Fase	ϕ	radián	rad
Flujo magnético	φ_M	weber	Wb
Frecuencia	f	hertz	Hz
Frecuencia angular	ω	radián/segundo	rad/s
Fuerza	$\vec{F}$	newton	N
Fuerza electromotriz	ξ	volt	V
Fuerza magnetomotriz	ξ_m	ampere	A
Impedancia	Z	ohm	Ω
Inductancia	L	henry	H

Cantidad	Símbolo	Unidad	Abreviatura
Intensidad de campo eléctrico	$\vec{E}$	volt/metro	V/m
Intensidad de campo magnético	$\vec{H}$	ampere/metro	A/m
Intensidad de radiación	U	watt/estereoradián	W/sr
Longitud de onda	λ	metro	m
Magnetización	$\vec{M}$	ampere/metro	A/m
Momento dipolar eléctrico	$\vec{p}$	coulomb-m	C·m
Momento dipolar magnético	$\vec{m}$	ampere-m ²	A·m ²
Número de onda	k	radián/metro	rad/m
Par de torsión	T	newton-metro	N·m
Permeabilidad	μ, μ_0	Henry/metro	H/m
Permeabilidad relativa	μ_r	(sin dimensiones)	—
Potencia	P	watt	W
Potencial eléctrico	V	volt	V
Potencial magnético (vector)	$\vec{A}$	weber/metro	Wb/m
Reactancia	X	ohm	Ω
Reluctancia	$\mathcal{R}$	henry ⁻¹	H ⁻¹
Resistencia	R	ohm	Ω
Susceptancia	B	mohs	$\mathcal{U}$
Susceptibilidad eléctrica	χ_e	(sin dimensiones)	—
Susceptibilidad magnética	χ_m	(sin dimensiones)	—
Vector de polarización	$\vec{P}$	coulomb/m ²	C/m ²
Vector de Poynting (densidad de potencia)	$\mathcal{P}$	watt/metro ²	W/m ²
Velocidad	v	metro/segundo	m/s
Voltaje	V	volt	V

Apéndice B Código Eléctrico Nacional

Código eléctrico nacional, el cual fija las corrientes máximas seguras o no peligrosas para alambres de cobre aislados con hule, de diversos diámetros.

	CALIBRE ^a	DIAMETRO in	DIAMETRO mm	DIAMETRO mils	AREA (A) CM	AREA (A) mm ²	KILOS (kg) POR 1000 m	CARGA EN AMPERES (I), A
Tabla 1	4/0	0.46	11.684	460.0	211600.0	107.2193	953.0	225.0
	3/0	0.409	10.389	409.0	167281.0	84.7626	756.0	175.0
	2/0	0.3648	9.266	364.8	133079.04	67.4321	599.0	150.0
0		0.3249	8.252	324.9	105560.01	53.488	475.0	125.0
1		0.2893	7.348	289.3	83694.49	42.4087	377.0	100.0
2		0.2576	6.543	257.6	66357.76	33.624	299.0	90.0
3		0.2294	5.827	229.4	52624.36	26.6651	237.0	80.0
4		0.2043	5.189	204.3	41738.49	21.1492	188.0	70.0
5		0.1819	4.62	181.9	33087.61	16.7658	149.0	55.0
6		0.162	4.115	162.0	26244.0	13.298	118.0	50.0
7		0.1443	3.665	144.3	20822.49	10.551	93.8	43.0
8		0.1285	3.264	128.5	16512.25	8.3669	74.4	35.0
9		0.1144	2.906	114.4	13087.36	6.6314	58.9	30.0
10		0.1019	2.588	101.9	10383.61	5.2614	46.8	25.0
11		0.0907	2.304	90.7	8226.49	4.1684	37.1	22.0
12		0.0808	2.052	80.8	6528.64	3.3081	29.4	20.0
13		0.072	1.829	72.0	5184.0	2.6268	23.3	17.0
14		0.0641	1.628	64.1	4108.81	2.082	19.5	15.0
15		0.0571	1.45	57.1	3260.41	1.652	14.7	10.0
16		0.0508	1.29	50.8	2580.64	1.3077	11.6	6.0
17		0.0453	1.151	45.3	2052.09	1.0399	9.23	5.0
18		0.0403	1.024	40.3	1624.09	0.823	7.32	3.0
19		0.0359	0.912	35.9	1288.81	0.653	5.80	2.25
20		0.032	0.813	32.0	1024.0	0.5189	4.6	2.0
21		0.0285	0.724	28.5	812.25	0.4117	3.65	1.72
22		0.0253	0.643	25.3	640.09	0.3243	2.89	1.2
23		0.0225	0.572	22.5	506.25	0.2566	2.3	0.85
24		0.0201	0.511	20.1	404.01	0.2048	1.82	0.8
25		0.0179	0.455	17.9	320.41	0.1623	1.44	0.64
26		0.0159	0.404	15.9	252.81	0.1281	1.14	0.5
27		0.0142	0.361	14.2	201.64	0.1021	0.908	0.4
28		0.0126	0.32	12.6	158.76	0.0804	0.72	0.3
29		0.0113	0.287	11.3	127.69	0.0648	0.571	0.24
30		0.01	0.254	10.0	100.0	0.0507	0.453	0.20
31		0.0089	0.226	8.9	79.21	0.0401	0.359	0.16
32		0.008	0.203	8.0	64.0	0.0324	0.285	0.12
33		0.0071	0.18	7.1	50.41	0.0256	0.226	0.098
34		0.0063	0.16	6.3	39.69	0.0201	0.179	0.08
35		0.0056	0.142	5.6	31.36	0.0159	0.142	0.065
36		0.005	0.127	5.	25.0	0.0127	0.113	0.05

^a una manera de identificar el diámetro del alambre

40 Calibres

1 mil = 10⁻³ in

A = 10⁶ D² [circular mil (CM)], D en in

	CALIBRE	CARGA EN AMPERES (I), A	DENSIDAD DE CORRIENTE (J), A/m ²	OHMS (Ω) POR 1000 m	CAMPO ELECTRICO (E), mV/m
Tabla 2	4/0	225.0	2098502.738	0.164	33.9337
	3/0	175.0	2064591.419	0.207	36.3369
	2/0	150.0	2224458.384	0.261	39.1504
0		125.0	2336970.745	0.322	41.1307
1		100.0	2358010.953	0.41	41.501
2		90.0	2676661.655	0.513	47.1092
3		80.0	3000169.987	0.65	52.803
4		70.0	3309817.075	0.815	58.2528
5		55.0	3280499.506	1.03	57.7368
6		50.0	3759955.116	1.3	66.1752
7		43.0	4075477.303	1.63	71.7284
8		35.0	4183159.984	2.1	73.6237
9		30.0	4523888.488	2.6	79.6204
10		25.0	4751539.304	3.3	83.627
11		22.0	5277774.034	4.13	92.8889
12		20.0	6045746.867	5.3	106.4051
13		17.0	6471822.744	6.6	113.904
14		15.0	7204732.908	8.3	126.8032
15		10.0	6052997.143	10.5	106.5328
16		6.0	4588455.363	13.4	80.7569
17		5.0	4808573.799	16.6	84.6309
18		3.0	3645472.68	21.0	64.1603
19		2.25	3445373.479	26.4	60.6386
20		2.0	3854541.487	34.0	67.84
21		1.72	4179086.999	42.0	73.552
22		1.2	3699839.538	54.0	65.1171
23		0.85	3313573.245	67.0	58.319
24		0.8	3907874.045	85.0	68.7786
25		0.64	3941999.796	106.0	69.3791
26		0.5	3903178.754	135.0	68.696
27		0.4	3914947.91	170.0	68.903
28		0.3	3729261.605	215.0	65.635
29		0.24	3709343.394	270.0	65.2844
30		0.2	3947050.483	340.0	69.468
31		0.16	3986416.344	430.0	70.161
32		0.12	3700359.828	540.0	65.1263
33		0.098	3836648.952	680.0	67.525
34		0.08	3977879.045	860.0	70.0107
35		0.065	4090533.823	1090.0	71.9933
36		0.05	3947050.483	1380.0	69.468

Las dos últimas columnas fueron calculadas considerando el valor de la resistividad a 25° C

$$\rho_{(25^{\circ}C)} = 1.76 \times 10^{-8} \quad \Omega \cdot m$$

Notas:

Un aumento de 3 números en el calibre divide el área entre 2 y aumenta la resistencia al doble. Por ejemplo, se puede reemplazar un calibre 18 por 2 calibre 21.

Un aumento de 6 números es la mitad del diámetro.

Un aumento de 10 números divide la sección (área) y el peso entre 10; y a la resistencia 10 veces la multiplica.

En la práctica se acostumbra tomar como equivalencia el valor aproximado $1 \text{ mm}^2 \cong 2000 \text{ CM}$, que también se puede expresar como $1 \text{ mm}^2 \cong 2 \text{ MCM}$ en donde debe leerse MCM como Mil Circular Mil.

Si queremos calcular las tablas para otro material solo cambiarían las columnas correspondientes a kilos por 1000 m, carga en amperes, densidad de corriente, Ω por 1000 m y campo eléctrico.

La resistencia eléctrica de un cuerpo se ve afectada considerablemente por los cambios de temperatura. Si consideramos una temperatura particular, necesariamente las dos últimas columnas de la tabla 2 cambiarían, calculando además el nuevo valor de la resistividad.

En muchos materiales (incluidos la mayor parte de los metales), la proporción entre el campo eléctrico y la densidad de corriente es una constante “ ρ ”, que es independiente del campo eléctrico productor de la corriente.

La resistividad es sólo propiedad del tipo de material, mientras que la resistencia depende tanto del tipo de material como de su forma.

La densidad de corriente así como el campo eléctrico son independientes de la longitud del conductor. Sin embargo, el voltaje necesario para producir ambos, si depende de esa longitud.

La tabla 1 muestra la resistividad, densidad, coeficiente de temperatura y conductividad para el cobre, plata y aluminio.

Tabla 1 Resistividad, densidad, coeficiente de temperatura y conductividad para el cobre, plata y aluminio.

	Material		
	Cu	Ag	Al
Resistividad ρ ($\Omega \cdot \text{m}$) 20° C	1.72×10^{-8}	1.59×10^{-8}	2.82×10^{-8}
Densidad ρ_m (kg/m^3)	8.93×10^3	10.5×10^3	2.7×10^3
Coeficiente de temperatura α ($^{\circ}\text{C}$) ⁻¹ 20° C	3.929×10^{-3}	3.802×10^{-3}	4.032×10^{-3}
Conductividad σ ($\Omega \cdot \text{m}$) ⁻¹ 20° C	5.81×10^{-7}	6.29×10^{-7}	3.55×10^{-7}

Corrección de la resistencia eléctrica por temperatura

$$R_2 = R_1(1 + \alpha \Delta T)$$

$$\alpha = \frac{1}{T + T_1}$$

Cu	T=234.5°C
Cu	T=234.5°C
Cu	T=234.5°C

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

El valor numérico de T y el intervalo de temperatura en que puede usarse esta ecuación depende de cada material y del proceso de fabricación a que haya sido sometido; en la práctica, la relación anterior se utiliza solo para el intervalo de 0°C a 150°C. El mayor número de problemas de Ingeniería que requieren corrección de la resistencia eléctrica por temperatura están comprendidos entre 0°C a 150°C. T se ha establecido en forma experimental considerando que la variación de la resistencia es lineal en el intervalo 0°C a 150°C y que para este valor la exactitud es aceptable.

Apéndice C Equivalentes R/X

Módulo 1											Módulo 2	Módulo 3		Módulo 1 y 2 en		Módulo 1,2 y 3 en
R/X	Primera sección			Segunda sección			Tercera sección				R/X	R/X		R/X		R/X
Ω	en			en			en				Ω	Ω		Ω		Ω
1.20E+03	1200	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno		1200	1200		600		400
600	ninguno	600	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno		600	600		300		200
300	ninguno	ninguno	300	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno		300	300		150		100
400	1200	600	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno		400	400		200		133.3333333
240	1200	ninguno	300	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno		240	240		120		80
200	ninguno	600	300	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno		200	200		100		66.6666667
171.428571	1200	600	300	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno		171.428571	171.428571		85.71428571		57.14285714
150	1200	ninguno	ninguno	1200	600	300	ninguno	ninguno	ninguno		150	150		75		50
133.333333	ninguno	600	ninguno	1200	600	300	ninguno	ninguno	ninguno		133.333333	133.333333		66.6666667		44.4444444
120	ninguno	ninguno	300	ninguno	600	300	ninguno	ninguno	ninguno		120	120		60		40
109.090909	ninguno	ninguno	300	1200	600	300	ninguno	ninguno	ninguno		109.090909	109.090909		54.54545455		36.36363636
100	1200	ninguno	300	1200	600	300	ninguno	ninguno	ninguno		100	100		50		33.33333333
92.3076923	ninguno	600	300	1200	600	300	ninguno	ninguno	ninguno		92.3076923	92.3076923		46.15384615		30.76923077
85.7142857	1200	600	300	1200	600	300	ninguno	ninguno	ninguno		85.7142857	85.7142857		42.85714286		28.57142857
80	1200	ninguno	ninguno	1200	600	300	1200	600	300		80	80		40		26.6666667
75	ninguno	600	ninguno	1200	600	300	1200	600	300		75	75		37.5		25
70.5882353	ninguno	ninguno	300	ninguno	600	300	1200	600	300		70.5882353	70.5882353		35.29411765		23.52941176
66.6666667	ninguno	ninguno	300	1200	600	300	1200	600	300		66.6666667	66.6666667		33.33333333		22.22222222
63.1578947	1200	ninguno	300	1200	600	300	1200	600	300		63.1578947	63.1578947		31.57894737		21.05263158
60	ninguno	600	300	1200	600	300	1200	600	300		60	60		30		20
57.1428571	1200	600	300	1200	600	300	1200	600	300		57.1428571	57.1428571		28.57142857		19.04761905

Referencia:

EXPERIMENTOS CON EQUIPO ELÉCTRICO

Apéndice C

Theodore Wildi, Michael J. De Vito

Editorial Limusa, México. 1975

Lab-Volt, Sistemas Educativos

Referencias de la sección “Apuntes”

Tema 1

FÍSICA VOLUMEN 2

David Halliday, Robert Resnick, Kenneth S. Krane
Compañía Editorial Continental, S.A de C.V México
ISBN 0-471-54804-9

POWER SYSTEM, ANÁLISIS & DESIGN,

J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, Thomas J. Oberbye
Cengage Learning
ISBN-13: 978-1-111-42579-1, ISBN-10: 1-111-42579-5

Tema 1, 2, 4 y 5

EXPERIMENTOS CON EQUIPO ELÉCTRICO

Theodore Wildi, Michael J. De Vito
Editorial Limusa, México. 1975
Lab-Volt, Sistemas Educativos

Tema 1, 2, 3, 4 y 5

MÁQUINAS ELÉCTRICAS Y SISTEMAS DE POTENCIA,

Theodore Wildi
Pearson, Prentice Hall
ISBN 0-13-177691-6

Tema 3

SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA,

Theodore Wildi
Guía del Instructor
Lab-Volt
Editorial Limusa, México 1979

Tema 5

TECNOLOGÍA APLICADA EN LA CAPACITACIÓN DE BOBINADO DE MOTORES

Jorge G. Ludewig Fons
Hector Pacheco V. Editor de Libros Técnicos
Derechos registrados conforme a la ley ante la Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AGUASCALIENTES
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

Instrumentación didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales

PERIODO ENE-JUN24
NOMBRE DE LA ASIGNATURA MAQUINAS ELECTRICAS
PLAN DE ESTUDIOS INGENIERÍA ELECTRÓNICA
CLAVE DE LA ASIGNATURA AEF1040-EA1
HORAS TEORÍA-HORAS PRÁCTICA-CRÉDITOS 03-02-05

1. CARACTERIZACIÓN DE LA ASIGNATURA.

Esta asignatura aporta al perfil del egresado la capacidad para entender el funcionamiento de las máquinas eléctricas y las habilidades para seleccionarlás, ponerlas en operación y controlarlas. Para integrarla, se ha revisado el tipo de máquinas eléctricas que existen y sobre todo aquellas que más uso y aplicación tienen.

Esta asignatura tiene como antecedentes las competencias de electromagnetismo, circuitos eléctricos I y II, y análisis de circuitos eléctricos y como procedentes las competencias de electrónica de potencia aplicada y en las asignaturas de los módulos de especialidad.

2. INTENCIÓN DIDÁCTICA

Analiza el funcionamiento de las diferentes máquinas eléctricas y realiza una adecuada selección para su aplicación, según el tipo de carga.

3. COMPETENCIA ESPECÍFICA DE LA ASIGNATURA

Analiza el funcionamiento de las diferentes máquinas eléctricas y realiza una adecuada selección para su aplicación, según el tipo de carga

4. ANÁLISIS POR COMPETENCIAS ESPECÍFICAS.

4.1. COMPETENCIA NO.: 01

4.2. DESCRIPCIÓN: Conoce el principio de operación del
transformador y comprende su funcionamiento
para determinar su aplicación.

4.3. TEMAS Y SUBTEMAS PARA DESARROLLAR LA COMPETENCIA ESPECÍFICA	4.4. ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE	4.5. ACTIVIDADES DE ENSEÑANZA	4.6. DESARROLLO DE COMPETENCIAS GENÉRICAS	4.7. HORAS TEÓRICO-PRÁCTICA
Fundamentos de electromagnetismo y transformador eléctrico. Leyes fundamentales de electromagnetismo Variables magnéticas El circuito magnético. Principio operacional del transformador Partes constitutivas del transformador Análisis del transformador ideal Análisis del transformador real y su circuito equivalente. Análisis de la regulación de tensión con diferentes tipos de cargas. Eficiencia de los transformadores a diferentes factores de potencia. Autotransformadores monofásicos. Conexiones de transformadores monofásicos en arreglos trifásicos. Conexiones de autotransformadores monofásicos en arreglos trifásicos.	-- Identificar las partes que conforman una máquina de C.C. y describir el principio de funcionamiento. -- Determinar las curvas características en los diferentes tipos de conexión de los generadores de C.C. -- Analizar los parámetros utilizados en una máquina de C.C. para su operación como generador y como motor. -- Determinar las curvas características en los diferentes tipos de conexión de los generadores de C.C.	1. Explicaciones y discusiones sobre los análisis matemáticos propuestos. 2. Discusiones sobre la solución de problemas y análisis de resultados. 3. Explicaciones para diseñar las herramientas computacionales involucradas. 4. Explicaciones y demostraciones prácticas usando equipo de laboratorio para que el alumno ejecute las prácticas de laboratorio del tema respectivo.	-- Capacidad de abstracción, análisis y síntesis -- Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica -- Capacidad de comunicación oral y escrita -- Habilidades en el uso de las tecnologías de la información y de la comunicación. -- Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas. -- Habilidades interpersonales. -- Capacidad de trabajo en equipo. -- Habilidades para buscar, procesar y analizar información procedente de fuentes diversas.	0906

4.8. INDICADORES DE ALCANCE	4.9. VALOR DEL INDICADOR %
A. Se adapta a situaciones y contextos complejos	16
B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas	16
C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad)	16
D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico	16
E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje.	16
F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada	20

4.10. NIVELES DE DESEMPEÑO.

DESEMPEÑO	NIVEL DE DESEMPEÑO	INDICADORES DE ALCANCE	VALORACIÓN NUMÉRICA
Competencia Alcanzada	Excelente	Cumple al menos cinco de los siguientes indicadores A. Se adapta a situaciones y contextos complejos B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad) D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada	95 a 100
	Notable	Cumple cuatro de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	85 a 94
	Bueno	Cumple tres de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	75 a 84
	Suficiente	Cumple dos de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	70 a 74
Competencia no alcanzada	No suficiente	No cumple con el 100% de evidencias conceptuales, procedimientos y actitudes de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	NA (No alcanzada)

4.11. MATRIZ DE EVALUACIÓN.

EVIDENCIA DE APRENDIZAJE	%	INDICADORES DE ALCANCE						EVALUACION FORMATIVA DE LA COMPETENCIA
		A	B	C	D	E	F	
INS2DOCGUA	100	16	16	16	16	16	20	Producto compuesto
Total		16	16	16	16	16	20	

4. ANÁLISIS POR COMPETENCIAS ESPECÍFICAS.

4.1. COMPETENCIA NO.: 02

4.2. DESCRIPCIÓN: Conoce el principio de funcionamiento de la
máquina de C.C. como generador y como motor
para su adecuada selección y aplicación.
Realiza el arranque y control de velocidad de los
motores de C.C.

4.3. TEMAS Y SUBTEMAS PARA DESARROLLAR LA COMPETENCIA ESPECÍFICA	4.4. ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE	4.5. ACTIVIDADES DE ENSEÑANZA	4.6. DESARROLLO DE COMPETENCIAS GENÉRICAS	4.7. HORAS TEÓRICO-PRÁCTICA
Máquinas de corriente directa. Componentes de las máquinas de CD Principio operacional de las máquinas de C.D., como generador y como motor Tipos de generadores (excitación separada, derivación, serie y compuesto) y sus curvas características Tipos de motores (derivación, excitación separada, serie y compuesto) y sus curvas características. Ecuaciones de par electromagnético para los motores de CD Condiciones de arranque para los diferentes tipos de motores de CD Control de los motores de CD 2.7.1 arranque. 2.7.2 velocidad. 2.7.3 inversión de giro. 2.7.4 frenado Aplicaciones de los motores de CD.	-- Investigar y analizar el principio de funcionamiento de una máquina síncrona como motor o como generador. -- Elaborar el circuito equivalente de la máquina síncrona. -- Trazar los diagramas fasoriales resultantes de un alternador alimentando con cargas resistivas, inductivas y capacitivas. -- Calcular la fuerza electromotriz inducida y su frecuencia variando la corriente de excitación del devanado de campo y la velocidad en forma matemática y comprobar experimentalmente. -- Conectar en paralelo los generadores síncronos o interconectarlos con un bus infinito tomando en cuenta las condiciones requeridas. -- Investigar las diferentes formas de arrancar el motor síncrono. -- Calcular los valores de par electromagnético, así como su potencia y rendimiento del motor síncrono.	1. Explicaciones y discusiones sobre los análisis matemáticos propuestos. 2. Discusiones sobre la solución de problemas y análisis de resultados. 3. Explicaciones para diseñar las herramientas computacionales involucradas. 4. Explicaciones y demostraciones prácticas usando equipo de laboratorio para que el alumno ejecute las prácticas de laboratorio del tema respectivo.	-- Capacidad de abstracción, análisis y síntesis -- Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica -- Capacidad de comunicación oral y escrita -- Habilidades en el uso de las tecnologías de la información y de la comunicación. -- Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas. -- Habilidades interpersonales. -- Capacidad de trabajo en equipo. -- Habilidades para buscar, procesar y analizar información procedente de fuentes diversas	0607

4.8. INDICADORES DE ALCANCE	4.9. VALOR DEL INDICADOR %
A. Se adapta a situaciones y contextos complejos	16
B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas	16
C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad)	16
D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico	16
E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje.	16
F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada	20

4.10. NIVELES DE DESEMPEÑO.

DESEMPEÑO	NIVEL DE DESEMPEÑO	INDICADORES DE ALCANCE	VALORACIÓN NUMÉRICA
Competencia Alcanzada	Excelente	Cumple al menos cinco de los siguientes indicadores A. Se adapta a situaciones y contextos complejos B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad) D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada	95 a 100
	Notable	Cumple cuatro de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	85 a 94
	Bueno	Cumple tres de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	75 a 84
	Suficiente	Cumple dos de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	70 a 74
Competencia no alcanzada	No suficiente	No cumple con el 100% de evidencias conceptuales, procedimientos y actitudes de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	NA (No alcanzada)

4.11. MATRIZ DE EVALUACIÓN.

EVIDENCIA DE APRENDIZAJE	%	INDICADORES DE ALCANCE						EVALUACION FORMATIVA DE LA COMPETENCIA
		A	B	C	D	E	F	
INS2DOCGUA	100	16	16	16	16	16	20	Producto compuesto
Total		16	16	16	16	16	20	

4. ANÁLISIS POR COMPETENCIAS ESPECÍFICAS.

4.1. COMPETENCIA NO.: 03

4.2. DESCRIPCIÓN: Aplica el principio de funcionamiento de la
máquina síncrona como motor y como generador
y su comportamiento en el sistema eléctrico para
controlar su operación

4.3. TEMAS Y SUBTEMAS PARA DESARROLLAR LA COMPETENCIA ESPECÍFICA	4.4. ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE	4.5. ACTIVIDADES DE ENSEÑANZA	4.6. DESARROLLO DE COMPETENCIAS GENÉRICAS	4.7. HORAS TEÓRICO-PRÁCTICA
Máquinas síncronas Componentes de las máquinas síncronas Principio operacional de las máquinas síncronas como generador y como motor. Fuerza electromotriz inducida y frecuencia. Circuito equivalente y diagramas fasoriales. Regulación de tensión con diferentes tipos de carga Operación en paralelo de los generadores síncrónicos. Métodos de arranque de los motores síncrónicos. Análisis fasorial del motor síncrono bajo diferentes condiciones de carga y de excitación. Potencia, par electromagnético y rendimiento.	Explicar el principio de operación, construcción y funcionamiento de los motores de inducción. – Investigar las partes constitutivas del motor jaula de ardilla y del motor de rotor devanado. – Realizar pruebas para la obtención de parámetros de los motores de inducción. – Identificar ventajas y desventajas del motor de inducción jaula de ardilla. – Investigar las diferentes aplicaciones del motor de inducción	1. Explicaciones y discusiones sobre los análisis matemáticos propuestos. 2. Discusiones sobre la solución de problemas y análisis de resultados. 3. Explicaciones para diseñar las herramientas computacionales involucradas. 4. Explicaciones y demostraciones prácticas usando equipo de laboratorio para que el alumno ejecute las prácticas de laboratorio del tema respectivo.	-- Capacidad de abstracción, análisis y síntesis – Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica -- Capacidad de comunicación oral y escrita – Habilidades en el uso de las tecnologías de la información y de la comunicación. – Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas. – Capacidad de trabajo en equipo. -- Habilidades para buscar, procesar y analizar información procedente de fuentes diversas	0705

4.8. INDICADORES DE ALCANCE	4.9. VALOR DEL INDICADOR %
A. Se adapta a situaciones y contextos complejos	16
B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas	16
C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad)	16
D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico	16
E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje.	16
F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada	20

4.10. NIVELES DE DESEMPEÑO.

DESEMPEÑO	NIVEL DE DESEMPEÑO	INDICADORES DE ALCANCE	VALORACIÓN NUMÉRICA
Competencia Alcanzada	Excelente	Cumple al menos cinco de los siguientes indicadores A. Se adapta a situaciones y contextos complejos B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad) D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada	95 a 100
	Notable	Cumple cuatro de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	85 a 94
	Bueno	Cumple tres de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	75 a 84
	Suficiente	Cumple dos de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	70 a 74
Competencia no alcanzada	No suficiente	No cumple con el 100% de evidencias conceptuales, procedimientos y actitudes de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	NA (No alcanzada)

4.11. MATRIZ DE EVALUACIÓN.

EVIDENCIA DE APRENDIZAJE	%	INDICADORES DE ALCANCE						EVALUACION FORMATIVA DE LA COMPETENCIA
		A	B	C	D	E	F	
INS2DOCGUA	100	16	16	16	16	16	20	Producto compuesto
Total		16	16	16	16	16	20	

4. ANÁLISIS POR COMPETENCIAS ESPECÍFICAS.

4.1. COMPETENCIA NO.: 04

4.2. DESCRIPCIÓN: Aplica las leyes del electromagnetismo para comprender el funcionamiento del motor de inducción. Selecciona el motor de acuerdo a las características de la carga para una aplicación en específico.
Utiliza los métodos de arranque y control de velocidad de los motores de inducción para determinar su aplicación.

4.3. TEMAS Y SUBTEMAS PARA DESARROLLAR LA COMPETENCIA ESPECÍFICA	4.4. ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE	4.5. ACTIVIDADES DE ENSEÑANZA	4.6. DESARROLLO DE COMPETENCIAS GENÉRICAS	4.7. HORAS TEÓRICO-PRÁCTICA
Motores de inducción Principio y análisis del motor jaula de ardilla. Principio y análisis del Motor con rotor devanado Arranque y control de velocidad de los motores de inducción Aplicaciones de los motores de inducción trifásicos	-- Investigar las partes que lo componen y las funciones del motor monofásico de inducción. -- Comprender el principio de funcionamiento del motor monofásico de inducción. -- Investigar los métodos de control de velocidad de los motores monofásicos de inducción. -- Elaborar un cuadro sinóptico donde aparezcan todos los tipos de motores monofásicos, sus características y aplicaciones -- Elaborar un cuadro sinóptico donde aparezcan todos los motores especiales, su funcionamiento, características y aplicaciones de cada uno de ellos.	1. Explicaciones y discusiones sobre los análisis matemáticos propuestos. 2. Discusiones sobre la solución de problemas y análisis de resultados. 3. Explicaciones para diseñar las herramientas computacionales involucradas. 4. Explicaciones y demostraciones prácticas usando equipo de laboratorio para que el alumno ejecute las prácticas de laboratorio del tema respectivo.	-- Capacidad de abstracción, análisis y síntesis -- Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica -- Capacidad de comunicación oral y escrita -- Habilidades en el uso de las tecnologías de la información y de la comunicación. -- Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas. -- Habilidades interpersonales. -- Capacidad de trabajo en equipo. -- Habilidades para buscar, procesar y analizar información procedente de fuentes diversas	0605

4.8. INDICADORES DE ALCANCE	4.9. VALOR DEL INDICADOR %
A. Se adapta a situaciones y contextos complejos	16
B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas	16
C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad)	16
D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico	16
E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje.	16
F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada	20

4.10. NIVELES DE DESEMPEÑO.

DESEMPEÑO	NIVEL DE DESEMPEÑO	INDICADORES DE ALCANCE	VALORACIÓN NUMÉRICA
Competencia Alcanzada	Excelente	Cumple al menos cinco de los siguientes indicadores A. Se adapta a situaciones y contextos complejos B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad) D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada	95 a 100
	Notable	Cumple cuatro de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	85 a 94
	Bueno	Cumple tres de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	75 a 84
	Suficiente	Cumple dos de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	70 a 74
Competencia no alcanzada	No suficiente	No cumple con el 100% de evidencias conceptuales, procedimientos y actitudes de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	NA (No alcanzada)

4.11. MATRIZ DE EVALUACIÓN.

EVIDENCIA DE APRENDIZAJE	%	INDICADORES DE ALCANCE						EVALUACION FORMATIVA DE LA COMPETENCIA
		A	B	C	D	E	F	
INS2DOCGUA	100	16	16	16	16	16	20	Producto compuesto
Total		16	16	16	16	16	20	

4. ANÁLISIS POR COMPETENCIAS ESPECÍFICAS.

4.1. COMPETENCIA NO.: 05

4.2. DESCRIPCIÓN: Conoce el funcionamiento y características de los motores monofásicos de inducción y los diferentes tipos de máquinas especiales para determinar sus aplicaciones.

4.3. TEMAS Y SUBTEMAS PARA DESARROLLAR LA COMPETENCIA ESPECÍFICA	4.4. ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE	4.5. ACTIVIDADES DE ENSEÑANZA	4.6. DESARROLLO DE COMPETENCIAS GENÉRICAS	4.7. HORAS TEÓRICO-PRÁCTICA
Motores Especiales Elementos básicos de los motores monofásicos Principio de operación del motor monofásico de inducción Arranque de los motores monofásicos de inducción Devanados de fase partida Arranque por capacitor Operación continua por capacitor Motor universal Motor de polos sombreados 9 Motor de pasos Servomotores Motores lineales Aplicación de los motores especiales	-- Investigar las partes que lo componen y las funciones del motor monofásico de inducción. -- Comprender el principio de funcionamiento del motor monofásico de inducción. -- Investigar los métodos de control de velocidad de los motores monofásicos de inducción. -- Elaborar un cuadro sinóptico donde aparezcan todos los tipos de motores monofásicos, sus características y aplicaciones -- Elaborar un cuadro sinóptico donde aparezcan todos los motores especiales, su funcionamiento, características y aplicaciones de cada uno de ellos.	1. Explicaciones y discusiones sobre los análisis matemáticos propuestos. 2. Discusiones sobre la solución de problemas y análisis de resultados. 3. Explicaciones para diseñar las herramientas computacionales involucradas. 4. Explicaciones y demostraciones prácticas usando equipo de laboratorio para que el alumno ejecute las prácticas de laboratorio del tema respectivo.	-- Capacidad de abstracción, análisis y síntesis -- Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica -- Capacidad de comunicación oral y escrita -- Habilidades en el uso de las tecnologías de la información y de la comunicación. -- Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas. -- Habilidades interpersonales. -- Capacidad de trabajo en equipo. -- Habilidades para buscar, procesar y analizar información procedente de fuentes diversas	0705

4.8. INDICADORES DE ALCANCE	4.9. VALOR DEL INDICADOR %
A. Se adapta a situaciones y contextos complejos	16
B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas	16
C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad)	16
D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico	16
E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje.	16
F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada	20

4.10. NIVELES DE DESEMPEÑO.

DESEMPEÑO	NIVEL DE DESEMPEÑO	INDICADORES DE ALCANCE	VALORACIÓN NUMÉRICA
Competencia Alcanzada	Excelente	Cumple al menos cinco de los siguientes indicadores A. Se adapta a situaciones y contextos complejos B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas C. Propone y/o explica soluciones o procedimientos no vistos en clase (creatividad) D. Introduce recursos y experiencias que promueven un pensamiento crítico E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje. F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregulada	95 a 100
	Notable	Cumple cuatro de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	85 a 94
	Bueno	Cumple tres de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	75 a 84
	Suficiente	Cumple dos de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	70 a 74
Competencia no alcanzada	No suficiente	No cumple con el 100% de evidencias conceptuales, procedimientos y actitudes de los indicadores definidos en el nivel de desempeño excelente	NA (No alcanzada)

4.11. MATRIZ DE EVALUACIÓN.

EVIDENCIA DE APRENDIZAJE	%	INDICADORES DE ALCANCE						EVALUACION FORMATIVA DE LA COMPETENCIA
		A	B	C	D	E	F	
INS2DOCGUA	100	16	16	16	16	16	20	Producto compuesto
Total		16	16	16	16	16	20	

5. FUENTES DE INFORMACIÓN Y APOYOS DIDACTICOS.

5.1. FUENTES DE INFORMACIÓN

1 D. Glover, M. Sarma, Análisis y diseño de Sistemas Eléctricos de Potencia, Ed. Thomson learning.
 2. Sthepen, J. Chapman, Máquinas eléctricas, Mc Graw Hill.
 3. Irving, L. Kosow, Máquinas eléctricas y transformadores, Prentice Hall.
 4. Siskind, Máquinas eléctricas, Mc Graw Hill.
 5. Fitzgerald, Electrical Machinery, Mc Graw Hill.
 6. Manual de Prácticas: Máquinas Eléctricas, José Alejandro Morones Alba, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2023.
 Complementarias:
 1. J. R., Cogdell, Fundamentos de máquinas eléctricas, Prentice Hall.
 2. Enriquez, Harper, ABC de las máquinas eléctricas y transformadores, Limusa.
 3. P.C. Sen, Principles of electric machines and power electronics, Wiley.

5.2. APOYOS DIDÁCTICOS.

Apuntes de cada unidad elaborados por un servidor.
 Herramientas computacionales para cada unidad diseñadas por un servidor.
 Prácticas de laboratorio para cada unidad diseñadas por un servidor empleando el equipo de laboratorio de Ingeniería Eléctrica.
 Prototipos diseñados y construidos por un servidor.

6. CALENDARIZACIÓN DE EVALUACIÓN (SEMANAS).

SEMANA	01 ED	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16 ES
T.P.					EF01EFO			EF02EFO			EF03EFO		EF04EFO			EF05EFO
T.R.					EF01EFO			EF02EFO			EF03EFO			EF04EFO		EF05EFO
S.D.					SD01				SD02						SD03	

ED = Evaluación diagnóstica, EF n = Evaluación formativa, ES = Evaluación sumativa.
 TP= Tiempo planeado TR=Tiempo real SD = Seguimiento departamental



Este documento fué validado y registrado en nuestro servidor por quien suscribe y puede ser localizado con este codigo QR para verificar su autenticidad. No requiere firma gráfica

FECHA DE ELABORACIÓN: 2024-01-22

DOCENTE

VO. BO.

MC. JOSE ALEJANDRO MORONES ALBA

M.E.C. JUAN CARLOS DIAZ GUTIERREZ
 JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

**POLÍTICAS ACADÉMICAS GENERALES DEL AÑO SABÁTICO DEL TECNOLÓGICO NACIONAL DE
MÉXICO**

CARTA DE RECONOCIMIENTO DEL AUTOR DE LOS DERECHOS A FAVOR DEL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Ciudad de México, 06/03/2025

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO.

PRESENTE

Bajo protesta de decir verdad, **José Alejandro Morones Alba**, personal docente adscrito al **Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica** del Tecnológico Nacional de México, manifiesto que en cumplimiento de mis actividades relacionadas con el Año Sabático elaboré la obra titulada **"Máquinas Eléctricas"**. Con base en lo anterior, y con fundamento en los artículos 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y 46 de su Reglamento, reconozco que el Tecnológico Nacional de México es titular de los derechos patrimoniales sobre la misma y le corresponden las facultades relativas a la divulgación, integridad de la obra y de colección, conservando el derecho a figurar como autor. Asimismo, respondo por la autoría y originalidad de la citada obra; y relevo de toda responsabilidad al Tecnológico Nacional de México de cualquier demanda o reclamación que llegara a formular alguna persona física o moral que considere que con esta obra es afectado en alguno de los derechos protegidos por la Ley en cita, asumiendo todas las consecuencias legales y económicas.

ATENTAMENTE



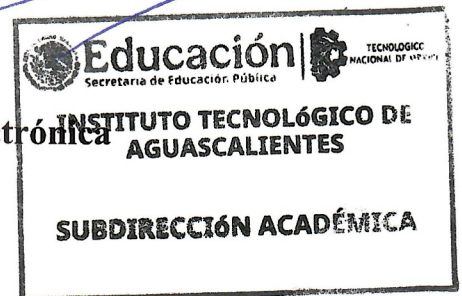
AUTOR

TECNOLOGICO NACIONAL DE MEXICO



Vo Bo
Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica



Reporte Intermedio de Año Sabático

B.1 Elaboración de apuntes/B1.2 Elaboración de apuntes de asignaturas:

Máquinas Eléctricas y Circuitos Eléctricos I

Periodo:

02 de septiembre de 2024 al 01 de marzo de 2025

Profesor:

José Alejandro Morones Alba

Número de dictamen AS-2-212/2024

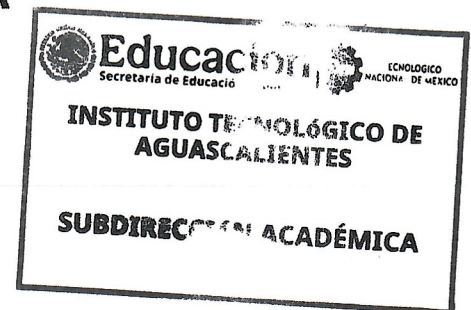
Aguascalientes, Ags., a 02 Marzo de 2025

Recibi 6/14/2025
USB contiene 2 archivos

JOSE ALEJANDRO MORONES ALBA

asignatura Maquinas Electricas.pdf

 Tecnológico Nacional de México



Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::20755:468643038

Fecha de entrega

20 jun 2025, 6:16 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

20 jun 2025, 6:53 p.m. GMT-6

Nombre de archivo

asignatura Maquinas Electricas.pdf

Tamaño de archivo

17.0 MB

549 Páginas

127.078 Palabras

657.223 Caracteres

Vo Bo
Subdirección Académica

30% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 27%  Fuentes de Internet
- 6%  Publicaciones
- 16%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
428 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Vo Bo
Subdirección Académica

