



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica

**EDUCACIÓN A DISTANCIA PARA EL APRENDIZAJE EN LÍNEA APLICADO
AL CURSO DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECAÁNICA 1**

Roger Amilcar Letona Cardona

Asesorado por Ing. Harold Eduardo Letona Cardona

Guatemala, marzo de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EDUCACIÓN A DISTANCIA PARA EL APRENDIZAJE EN LÍNEA APLICADO
AL CURSO DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECAÁNICA 1**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ROGER AMILCAR LETONA CARDONA

ASESORADO POR EL ING. HAROLD EDUARDO LETONA CARDONA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MARZO DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonzo Rivera Castillo
SECRETARIO	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EDUCACIÓN A DISTANCIA PARA EL APRENDIZAJE EN LÍNEA APLICADO AL CURSO DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECAÁNICA 1,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 23 de mayo de 2006.



Roger Amilcar Letona Cardona.

AGRADECIMIENTOS A

- Dios Guía en mi camino
- Mis padres María Nineth Cardona Mancio
Amilcar Eduardo Letona Trujillo
Por todo el esfuerzo que hicieron para que esto fuera
posible, gracias.
- Mi hermano Harold Eduardo Letona Cardona
Por ser mi apoyo y ejemplo a lo largo de toda mi vida
- Mi familia Por ese apoyo incondicional que siempre me brindaron,
especialmente a mis tíos,
Luis Vilaro
Julio Cardona
- Mis amigos A todos por estar a mi lado a lo largo de la carrera,
Especialmente a mi amigo
Ing. Kenneth Estrada

La Universidad de San Carlos de Guatemala.

La Facultad de Ingeniería.

La Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. CIRCUITOS MAGNÉTICOS Y MATERIALES MAGNÉTICOS	1
1.1 conceptos básicos	1
1.1.1 Campo magnético	2
1.1.2 Corrientes alternas	3
1.1.3 Flujo magnético	3
1.2. Materiales magnéticos	4
1.2.1 Propiedades de los materiales magnéticos	4
1.2.2 Perdidas en materiales magnéticos	6
1.2.3 Aplicaciones	7
1.3 Circuitos magnéticos	8
2. EL TRANSFORMADOR	11
2.1 Generalidades	11
2.1.1 Inducción mutua y autoinducción	11
2.1.2 Principio de funcionamiento del transformador	12
2.1.3 Determinación las constantes del transformador	13
2.1.3.1 prueba de vacío	14
2.1.3.2 prueba de cortocircuito	15

2.1.4 Regulación del transformador	16
2.1.5 Eficiencia del transformador	16
2.1.6 Tipos de núcleos	17
2.1.7 Herrajes o armadura	17
2.2 Circuitos equivalentes	18
2.2.1 Transformador ideal	18
2.2.1.1 Potencia en un transformador ideal	19
2.2.2 Transformador real	20
2.2.2.1 Circuito equivalente para transformador real	21
2.2.2.2 Aplicación de los circuitos equivalentes	22
2.3 Diagramas fasoriales del transformador	22
2.4 Conexiones de los transformadores	24
2.4.1 El concepto de polaridad	24
2.4.2 Polaridad en un transformador	25
2.4.3 Sistemas polifásicos	25
2.4.4 Transformadores trifásicos	26
2.4.5 Conexiones de transformador trifásico	27
2.4.5.1 Conexión estrella (Y)- estrella (Y)	27
2.4.5.2 Conexión estrella (Y)- delta (Δ)	29
2.4.5.3 Conexión delta (Δ)- estrella (Y)	30
2.4.5.4 Conexión delta (Δ)- delta (Δ)	31
2.4.6 Conexión delta abierta-delta abierta	32
2.4.7 Conexión de transformadores en paralelo	32
2.5 Pruebas a transformadores	33
2.5.1 Descripción de pruebas a los transformadores	33
2.5.2 Pruebas al aceite del transformador	35
2.5.2.1 Prueba de rigidez dieléctrica del aceite	35
2.5.3 Prueba de resistencia de aislamiento	36

3. MAQUINAS ROTATIVAS DE CA	39
3.1 Conceptos básicos	39
3.1.1 Campo magnético giratorio	39
3.1.2 Inversión de rotación del campo magnético	40
3.1.3 Distribución de embobinados	40
3.1.4 Generadores de corriente alterna	41
3.1.5 Motores de corriente alterna	42
3.2 Máquina síncrona	43
3.2.1 Generador síncrono	43
3.2.1.1 Velocidad de un generador sincrónico	46
3.2.1.2 Circ. equivalente de un generador síncrono	47
3.2.2 Motores sincrónicos	48
3.2.2.1 Arranque de motores sincrónicos	48
3.3 Máquina asíncrona	49
3.3.1 Motor asíncrono o de Inducción	49
3.3.2 Deslizamiento	51
3.3.3 Característica par-velocidad	51
3.3.4 Generador de inducción	53
4. MÁQUINAS ROTATIVAS DE CC	55
4.1 Generadores de CC	55
4.1.1 Generador con excitación independiente	57
4.1.1.1 Control de voltaje en generador exc. ind.	57
4.1.2 Generador con excitación en derivación	58
4.1.3 Generador con excitación en serie	59
4.1.4 Generador con excitación compuesta acumulativa	60
4.1.5 Generador con excitación compuesta diferencial	62

4.2 Motores de CC	64
4.2.1 Motor con excitación independiente	65
4.2.2 Motor con excitación en derivación	66
4.2.3 Motor con excitación serie	68
4.2.3.1 Control de velocidad de un motor serie	69
4.2.4 Motor con excitación compuesta o compound	70
4.2.5 Motor de CC de imán permanente	72
4.2.6 Motor universal	72
CONCLUSIONES	73
RECOMENDACIONES	75
BIBLIOGRAFÍA	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Fuerza de un campo magnético sobre una carga	1
2	Campo magnético y campo eléctrico	3
3	Líneas de flujo magnético	4
4	Dominios magnéticos	6
5	Corriente de excitación y lazo de histéresis	7
6	Circuito magnético simple	9
7	Analogía entre circuitos eléctricos y magnéticos	9
8	Efecto borde en un entrehierro	10
9	Circuito equivalente para condición en vacío	14
10	Circuito equivalente para condición de corto circuito	15
11	Tipos de núcleos	17
12	Esquema de un transformador ideal	18
13	Símbolo esquemático de un transformador ideal	18
14	Símbolo esquemático de un transformador real	21
15	Circuito equivalente del transformador referido al secundario	22
16	Diagrama fasorial del transformador en atraso	23
17	Diagrama fasorial del transformador en unitario	23
18	Diagrama fasorial del transformador en adelanto	24
19	Conexión Y-Y	27
20	Conexión Y- Δ	29
21	Conexión Y- Δ	30
22	Conexión Δ - Δ	31

23	Vector de campo magnético resultante en un estator	39
24	Bobina de estator prefabricado	41
25	Diagrama de potencia de un generador de CA	42
26	Diagrama de potencia de un motor de CA	43
27	Rotor de polos saliente y polos no salientes	44
28	Generador sincrónico	45
29	Circuito equivalente por fase de un generador sincrónico	47
30	Rotor jaula de ardilla	49
31	Curva par-velocidad de un motor de inducción	52
32	Circuito equivalente de un generador de CC	56
33	Generador con excitación independiente	57
34	Generador con excitación en derivación	59
35	Circuito equivalente de un generador con excitación serie	59
36	Generador compuesto acumulativo en derivación larga	61
37	Generador compuesto acumulativo en derivación corta	61
38	Generador compuesto diferencial en derivación larga	63
39	Circuito equivalente de un motor de CC	64
40	Circuito equivalente de un motor con excitación independiente	66
41	Circuito equivalente de un motor con excitación en derivación	67
42	Circuito equivalente de un motor con excitación serie	69
43	Motor compound en derivación larga y en derivación corta	71

LISTA DE SÍMBOLOS

AC	Corriente Alterna
B	Densidad de campo magnético
CC	Corriente Continua
<i>f</i>	Frecuencia eléctrica
F	Fuerza
FEM	Fuerza Electromotriz
Hz	Hertz
I	Corriente eléctrica
<i>jX</i>	Reactancia
L	Inductancia
m.	Metros (distancia)
MΩ	Mega ohmios (Millones de ohmios)
η	Eficiencia
n	Velocidad angular
N	Newton (fuerza)
p	Polos
P	Potencia eléctrica
Q	Carga eléctrica
R	Resistencia
\mathcal{R}	Reluctancia
Rpm	Revoluciones por minuto
S	Deslizamiento
v	Velocidad
V	Voltaje
Vcc	Voltaje de corto circuito
Wb	Weber

Kv	Kilo voltios (miles de voltios)
Z	Impedancia
ϕ	Flujo magnético
Δ	Delta
Y	Estrella
Ω	Ohmio
τ	Par
$^{\circ}$	Grados decimales
θ	Ángulo
ε	Fuerza electromotriz autoinducida

GLOSARIO

Analogía	Relación de semejanza entre cosas distintas.
Bobina	Componente de un circuito eléctrico formado por un alambre aislado que se arrolla en forma de hélice con un paso igual al diámetro del alambre.
Bornes	Botones de metal en que suelen terminar ciertas máquinas y aparatos eléctricos, y a los cuales se unen los hilos conductores.
Campo	Magnitud distribuida en el espacio, en oposición a una partícula que existe en un solo punto.
Conductancia	Inverso de la resistencia eléctrica, representa la facilidad con que un material deja pasar la corriente eléctrica.
Conmutador	Dispositivo de los aparatos eléctricos que sirve para que una corriente cambie de conductor.
Electroimán	Imán artificial que consta de un núcleo de hierro dulce, rodeado por una bobina por la que pasa una corriente eléctrica.
Electrodo	Extremo de un conductor en contacto con un medio, al que lleva o del que recibe una corriente eléctrica.

Electrostática	Parte de la física, que estudia los sistemas de cuerpos electrizados en equilibrio.
Embalamiento	Hacer que adquiera gran velocidad un motor desprovisto de regulación automática, cuando se suprime la carga.
Emulsificación	Dispersión de un líquido en otro no miscible con él.
Energía	Capacidad de un cuerpo para realizar trabajo.
Entrehierro	Espacio comprendido entre la armadura y las piezas polares.
Escobillas	Haz de hilos de cobre destinado a mantener el contacto, por frotación, entre dos partes de una máquina eléctrica, una de las cuales está fija mientras la otra se mueve.
Estator	Parte fija de una máquina dentro de la cual gira un rotor.
Frecuencia	Toda magnitud en la que, además de la cuantía, hay que considerar el punto de aplicación, la dirección y el sentido.
Histéresis	Fenómeno por el que el estado de un material depende de su historia previa. Se manifiesta por el retraso del efecto sobre la causa que lo produce.
Impedancia	Relación entre la tensión alterna aplicada a un circuito y la intensidad de la corriente producida.

Inducción	generación de una corriente eléctrica en un conductor en movimiento en el interior de un campo magnético
Levitación	Sensación de mantenerse en el aire sin ningún punto de apoyo.
Megger	Dispositivo utilizado para medir la resistencia eléctrica de un terreno
Ohmio	Unidad de resistencia eléctrica del Sistema Internacional, equivalente a la resistencia eléctrica que da paso a una corriente de un amperio cuando entre sus extremos existe una diferencia de potencial de un voltio.
Par	Sistema de dos fuerzas iguales paralelas, de sentidos contrarios y aplicadas en dos puntos distintos, que crean un movimiento de rotación
Polos magnéticos	Cada uno de los dos puntos opuestos de un cuerpo, en los cuales se acumula en mayor cantidad la energía de un agente físico
Reactancia	Impedancia ofrecida por un circuito eléctrico en el que existe inducción o capacidad
Resistencia	Dificultad que opone un circuito al paso de una corriente

Resonancia magnetica	Absorción de energía por los átomos de una sustancia cuando son sometidos a campos magnéticos de frecuencias específicas. Técnica basada en este fenómeno, que obtiene imágenes internas de un organismo, especialmente con fines diagnósticos.
Rigidez dieléctrica	La capacidad de un dieléctrico de soportar campos eléctricos sin perder sus propiedades aislantes se denomina resistencia de aislamiento o rigidez dieléctrica
Rotor	Parte giratoria de una máquina eléctrica o de una turbina.
Saturación	Aumentar la señal de entrada en un sistema hasta que no se produzca el incremento en su efecto.
Sincronismo	Coincidencia de hechos o fenómenos en el tiempo. También se desarrolla en perfecta correspondencia temporal con otro proceso o causa, correspondencia en el tiempo entre las diferentes partes de los procesos.
Voltímetro	Aparato que se emplea para medir potenciales eléctricos.

RESUMEN

En la actualidad la facultad de Ingeniería se ha visto sobre poblada en algunos cursos, los catedráticos y los alumnos se ven en la incomodidad de impartir y recibir a la vez una clase en un ambiente inapropiado para la buena comprensión, tal motivo ha causado que muchos alumnos abandonen el curso, lo que provoca un alto grado de repitencia y más aglomeración para el próximo semestre, creando un círculo vicioso.

Este problema provoca también malestar e incomodidad a los catedráticos y auxiliares de dichos curso, ya que con gran población estudiantil en un aula, los conceptos y los conocimientos son más difíciles de exponer. Es por eso que surge la necesidad de buscar nuevas ideas y métodos que nos ayuden a transmitir los conocimientos a un alto grado de población estudiantil de una forma más personalizada y sin perder el profesionalismo, auxiliándonos de la tecnología actual que nos brinda la computación y el uso del Internet.

En vista de los problemas que aquejan a la Facultad de Ingeniería en la sobrepoblación que existen en sus aulas en determinadas cátedras y a la escasez de recursos económicos y físicos, se propone utilizar una Universidad Virtual para la educación a distancia, a fin de brindar más comodidad y confiabilidad sin perder el nivel de formación educativa y sin restringir a los estudiantes el derecho a la educación. Este método es una forma de transmitir conocimientos por medio de tecnología moderna como Internet, Cd's Interactivos, páginas Web, Video Conferencias, etc., a todos aquellos estudiantes que por cualquier razón no pueden hacer presencia a las clases magistrales, la formación a distancia sería la más apropiada para ellos, pues solo así podrán progresar y avanzar a su propio ritmo y que se adapte a sus necesidades de tiempo.

OBJETIVOS

General

Explorar otra alternativa de enseñanza en la facultad de ingeniería a través del uso de la tecnología y aplicaciones en línea, como las clases virtuales, para el aprendizaje a distancia, utilizando así, los recursos disponibles en la facultad.

Específicos

1. Facilitar el acceso al material de apoyo que necesiten, tanto el estudiante como el docente.
2. Reducir los costos de educación y enseñanza de los estudiantes de la facultad de ingeniería.
3. Permitir el acceso a los cursos e información requerida por los estudiantes, con total libertad de horarios.
4. Beneficiar y dar mayores posibilidades a los estudiantes que se encuentran alejados de los centros de formación. Crear un manual de fácil uso que apoye a los docentes del portal de educación a distancia.

INTRODUCCIÓN

En la Facultad de Ingeniería se a visto un incremento anualmente de estudiantes, lo que ha ocasionado que los recursos económicos y físicos sean cada vez menores, es por eso que se ha visto la necesidad de explorar nuevas maneras de enseñanza que ayuden a resolver o a reducir en cierta medida dicha situación.

En la actualidad uno de los métodos más utilizados en la educación a distancia es e-Learning o aprendizaje en línea, el cual es un conjunto de aplicaciones de las cuales se utiliza un aula virtual, donde tanto estudiantes como catedráticos puedan acceder al contenido de un curso a través de Internet en cualquier hora del día y desde cualquier lugar que preste las condiciones necesarias para conectarse a Internet.

Uno de los grandes beneficios que tendrá la Facultad de Ingeniería con el desarrollo de la educación a distancia es que no tendrá costos en la implementación de dicho sistema, porque se utilizaran los recursos con los que cuenta la facultad y la herramienta de desarrollo se basaran en licencias de código libre para un uso con fines educativos únicamente, además un beneficio a la población estudiantil será reducir los costos de transporte y copias de material didáctico a los estudiantes.

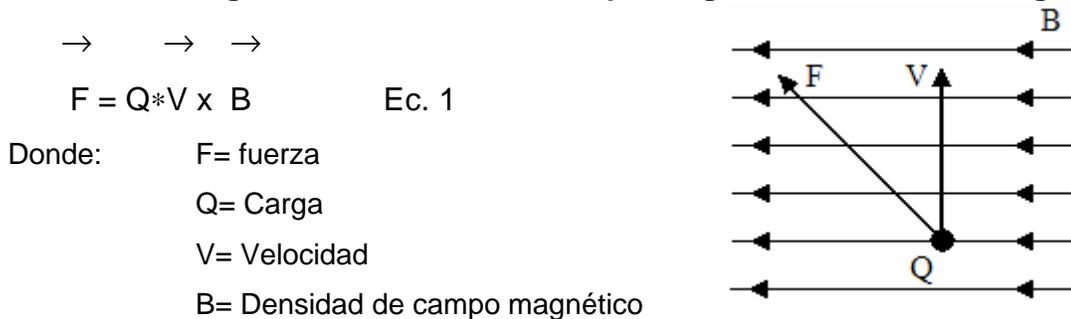
El presente trabajo de graduación contiene los conceptos del curso de Conversión de Energía Electromecánica 1, los cuales están presentes en el curso virtual de dicha clase y a la cual se puede acceder desde la página: <http://saesap.ingenieria-usac.edu.gt/> , e inscribiéndose en dicho curso.

1. CIRCUITOS MAGNÉTICOS Y MATERIALES MAGNÉTICOS

1.1 Conceptos básicos

En electrostática, las fuerzas que experimentan una carga eléctrica tiene la dirección del campo eléctrico. En el caso del Campo Magnético, la fuerza que experimenta una carga tiene un carácter diferente. Si la carga esta en reposo, esta no experimenta fuerza alguna. Sin embargo, sí esta mueve, aparece una fuerza como:

Figura 1. Fuerza de un campo magnético sobre una carga



Las corrientes eléctricas están constituidas por muchas partículas cargadas en movimiento a lo largo del conductor. Por lo tanto, si el conductor se encuentra sumergido en un campo magnético, todas las partículas que forman la corriente, experimentan una fuerza. Esta fuerza se traduce en una fuerza neta sobre el conductor.

El fenómeno observado se denomina fuerza electromotriz inducida ó simplemente FEM. Estos efectos quedan establecidos en la ley de Faraday y Lenz, que dice: *la Fem producida por variaciones del flujo magnético en el tiempo, tienen un sentido que siempre se opone a la causa que lo produce*, y se expresa como:

$$FEM = -\frac{\partial\phi}{\partial t} \text{ [volt]} \quad \text{Ec. 2}$$

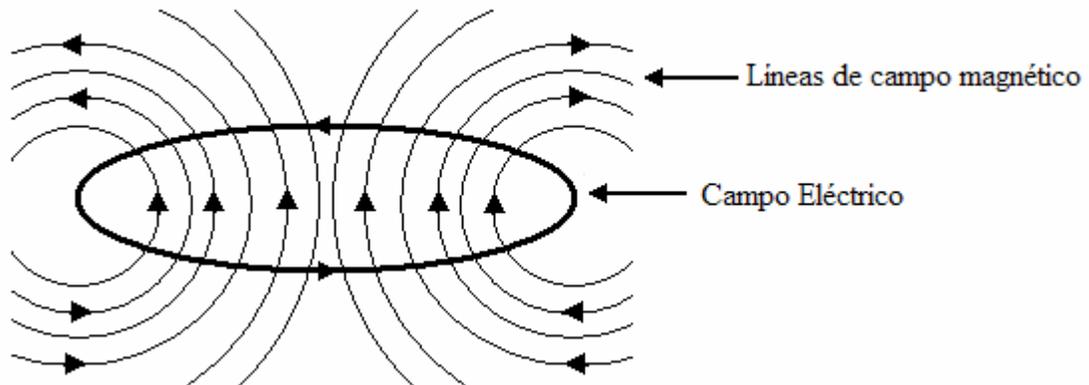
Donde: $-\frac{\partial\phi}{\partial t}$ = Cambio de flujo magnético con respecto al tiempo

1.1.1 Campo magnético

Los campos magnéticos son los mecanismos fundamentales por medio de los cuales la energía se convierte de una forma en otra, en motores, generadores y transformadores. Cuatro principios básicos describen cómo se utilizan los campos magnéticos en estos aparatos:

- Un alambre cargado de electricidad produce un campo magnético a su alrededor.
- Un campo magnético variable induce un voltaje en un alambre, si pasa a través de él. (Esta es la base del funcionamiento del transformador)
- Un alambre que transporta corriente eléctrica y que esta en presencia de un campo magnético, tiene una fuerza inducida sobre él. (Esta es la base del funcionamiento de un motor).
- Un alambre en movimiento, en presencia de un campo magnético, tiene un voltaje inducido en él. (Esta es la base del funcionamiento de un generador).

Figura 2. Campo magnético y campo eléctrico



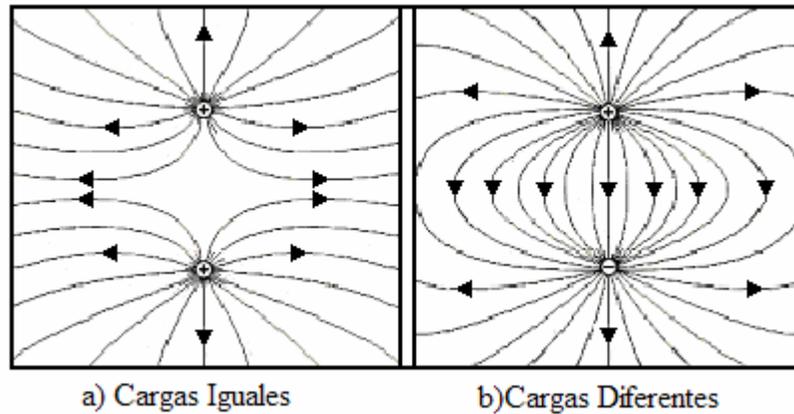
1.1.2 Corrientes alternas

Cuando se hace oscilar un conductor en un campo magnético, el flujo de corriente en el conductor cambia de sentido tantas veces como lo hace el movimiento físico del conductor. Varios sistemas de generación de electricidad se basan en este principio, y producen una forma de corriente oscilante llamada corriente alterna. La característica práctica más importante de la corriente alterna es que su voltaje puede cambiarse mediante un sencillo dispositivo electromagnético denominado transformador.

1.1.3 Flujo magnético

Cuando se observa, con la ayuda de limaduras de hierro, el campo magnético creado por un imán, se aprecia que, en los polos, las líneas de fuerza están más próximas y que se separan al alejarse de ellos. Parece razonable relacionar por convenio una proporcionalidad directa entre la intensidad del campo y la cantidad de líneas de fuerza que atraviesan una superficie. Cuanto más apretadas están las líneas en una región, tanto más intenso es el campo en dicha región.

Figura 3. Líneas de flujo magnético



La idea de flujo corresponde entonces con la cantidad de campo magnético que atraviesa una superficie determinada. En el Sistema Internacional se expresa en wéber [Wb].

1.2. Materiales magnéticos

1.2.1 Propiedades de los materiales magnéticos

Una de las clasificaciones de los materiales magnéticos que se basa en la reacción del material ante un campo magnético los divide en:

1. Diamagnéticos,
2. Paramagnéticos y
3. Ferromagnéticos

Un material *diamagnético* en un campo magnético, se produce en él un momento magnético de sentido opuesto al campo aplicado. Se sabe que esta propiedad se debe a las corrientes eléctricas inducidas en los átomos y moléculas individuales.

El comportamiento *paramagnético* se produce cuando el campo magnético aplicado alinea todos los momentos magnéticos ya existentes en el material. Esto produce un momento magnético global que se suma al campo magnético aplicado. El paramagnetismo en sustancias no metálicas suele caracterizarse por una dependencia de la temperatura: la intensidad del momento magnético inducido varía inversamente con la temperatura.

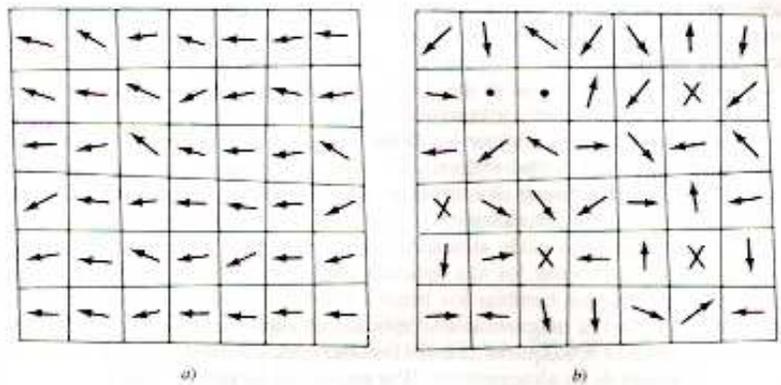
Las sustancias *ferromagnéticas* son las que, como el hierro, mantienen un momento magnético incluso cuando el campo magnético externo se hace nulo. Los materiales ferromagnéticos están compuestos por un gran número de dominios, regiones en las cuales los momentos magnéticos de todos sus átomos son paralelos, dando lugar con ello a un momento magnético neto para cada dominio. En una muestra de material no magnetizado, los momentos magnéticos de los dominios están orientados al azar, y el flujo magnético resultante en el material es cero.

Cuando se aplica una fuerza magnetizadora externa a estos materiales, los momentos magnéticos de los dominios tienden a alinearse con el campo magnético aplicado. Como consecuencia, se originan un valor mucho mayor de la densidad de flujo que el que se tendría sólo con la fuerza magnetizante. Este comportamiento continúa hasta que todos los momentos magnéticos están alineados con el campo aplicado; en este punto ya no pueden contribuir al crecimiento de la densidad de flujo magnético, y se dice que el material está completamente saturado.

En ausencia de una fuerza magnetizante aplicada externamente, los dominios de los momentos magnéticos se alinean temporalmente a lo largo de determinadas direcciones asociadas con la estructura cristalina del dominio, y a esas direcciones se les llama ejes de magnetización fácil.

Un material ferromagnético acaba perdiendo sus propiedades magnéticas cuando se calienta, esta pérdida es completa por encima de una temperatura conocida como punto de Curie.

Figura 4. Dominios magnéticos: a) alineados en la presencia de un campo magnético externo b) orientados desordenadamente



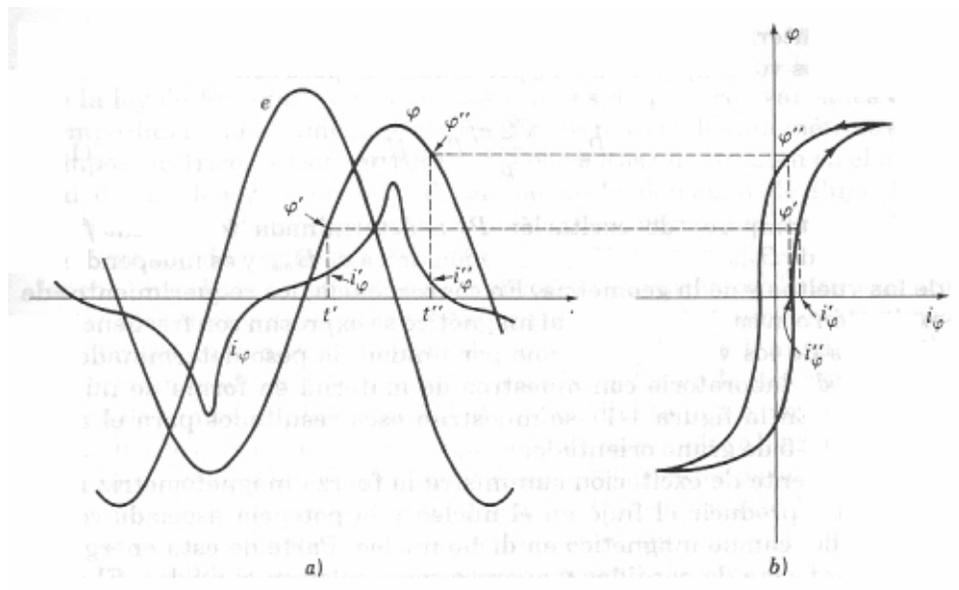
Fuente: Stephen J. Chapman, Maquinas Eléctricas, Pág. 27

1.2.2 Pérdidas en materiales magnéticos

Hay dos formas de pérdidas en los materiales magnéticos. La primera es el calentamiento óhmico, asociado con las corrientes parásitas o de remolino. Los campos magnéticos variables dan lugar a campos eléctricos, estos campos eléctricos ocasionan corrientes parásitas que circulan en el material del núcleo. Para reducir las corrientes parásitas, las estructuras magnéticas se fabrican en general en forma de hojas delgadas de laminaciones de material magnético, con ello se reduce la magnitud de estas corrientes, ya que las laminaciones interrumpen las trayectorias de la corriente; mientras más delgadas sean las laminaciones, serán menores las pérdidas, La pérdida de potencia que causan las corrientes parásitas se disipa en forma de calor en el núcleo.

La segunda forma de pérdidas se conoce como pérdida por histéresis en un núcleo de hierro, esta es la energía necesaria para lograr la reorientación de los dominios durante cada ciclo de la corriente alterna aplicada a un núcleo. El área encerrada en la curva de histéresis, formada por la aplicación de una corriente alterna al núcleo, es directamente proporcional a la pérdida de energía en un ciclo dado de AC. Entre más pequeño sea el área de la curva de histéresis y en la misma forma más pequeñas las pérdidas resultantes.

**Figura 5. a) Corriente de excitación; Voltaje, flujo y corriente de excitación
b) lazo de Histéresis correspondiente**



Fuente: Fitzgerald, Kingsley Jr. Umans, Maquinas Eléctricas, Pág. 23

1.2.3 Aplicaciones

Han surgido numerosas aplicaciones del magnetismo y de los materiales magnéticos. El electroimán, es la base del motor eléctrico y el transformador, el desarrollo de nuevos materiales magnéticos ha influido notablemente en la revolución de los ordenadores o computadoras.

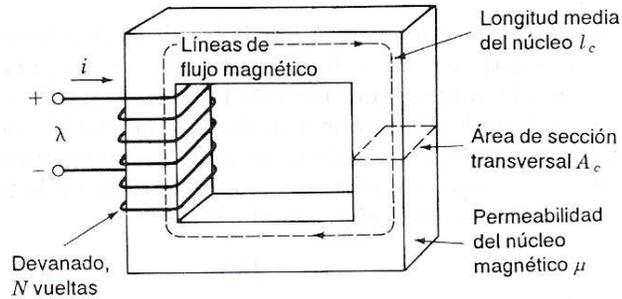
Se usan los materiales magnéticos para delimitar y dirigir a los campos magnéticos en trayectorias bien definidas. En un transformador se usan para maximizar el acoplamiento entre los devanados. En las máquinas eléctricas se usan los materiales magnéticos para dar forma a los campos magnéticos de modo que se logren hacer máximas las características de producción de par.

Los materiales magnéticos también son componentes importantes de las cintas y discos para almacenar datos, además los imanes grandes y potentes son cruciales en muchas tecnologías modernas. Los trenes de levitación magnética utilizan poderosos imanes para elevarse por encima de los rieles y evitar el rozamiento, otra aplicación es en la exploración mediante resonancia magnética nuclear, una importante herramienta de diagnóstico empleada en medicina.

1.3 Circuitos magnéticos

Prácticamente toda maquinaria eléctrica emplean materiales magnéticos para conformar y dirigir los campos magnéticos, los cuales actúan como medio para la transferencia y conversión de energía, por ello la capacidad de analizar y describir las cantidades magnéticas es una herramienta esencial para la comprensión de dichos dispositivos. Los materiales magnéticos juegan un papel importante en la determinación de las propiedades de un equipo electromagnético y afectan su tamaño y eficiencia.

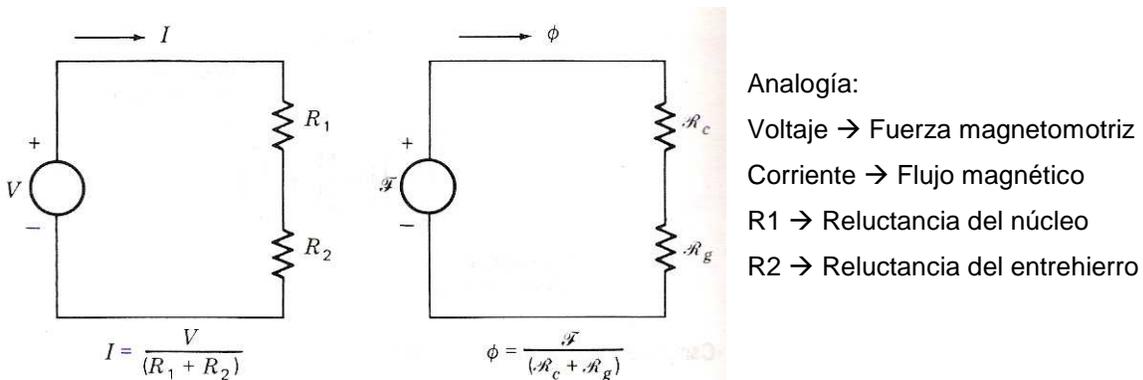
Figura 6. Circuito magnético simple



Fuente: Fitzgerald, Kingsley Jr. Umans, Maquinas Eléctricas, Pág. 3

Un circuito magnético consta de una estructura compuesta de material magnético. La presencia de ese material hace que el flujo magnético esté confinado a las trayectorias definidas por la estructura, de modo semejante a como las corrientes están confinadas a los conductores de un circuito eléctrico. El empleo de este concepto del circuito magnético se ejemplifica en esta sección y se verá que se aplica muy bien a muchas situaciones.

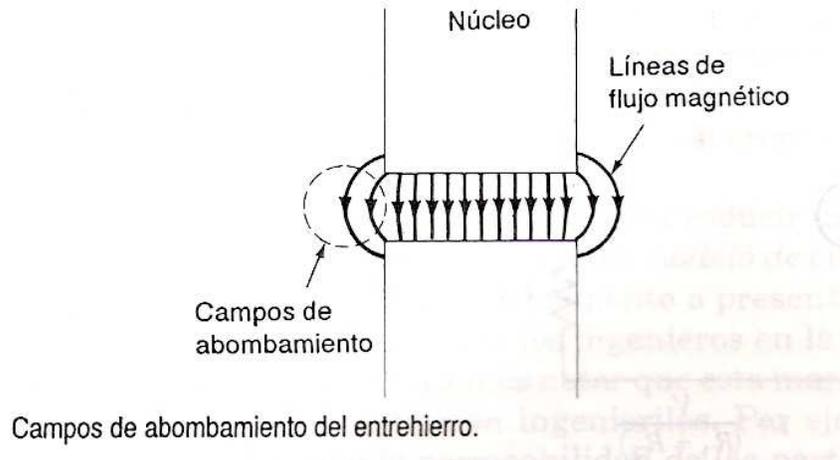
Figura 7. Analogía entre los circuitos a) eléctricos y b) magnéticos



Fuente: Fitzgerald, Kingsley Jr. Umans, Maquinas Eléctricas, Pág. 8

Nuestro propósito se limita por el momento a presentar algunos de los conceptos y terminología que usan los ingenieros en la resolución de problemas prácticos de diseño.

Figura 8. Efecto borde en un entrehierro



Fuente: Fitzgerald, Kingsley Jr. Umans, Maquinas Eléctricas, Pág. 7

El efecto de borde se da en un entrehierro de aire y se observa el aumento del área de la sección transversal del entrehierro de aire, comparada con la sección transversal del metal. La analogía entre la solución de los circuitos eléctricos y magnéticos puede aprovecharse con frecuencia para producir soluciones simples para los flujos en circuitos magnéticos considerablemente complejos.

2. EL TRANSFORMADOR

2.1 Generalidades

El transformador, es un dispositivo que no tiene partes móviles, el cual cambia niveles de energía eléctrica de un circuito u otro bajo el principio de inducción electromagnética. La transferencia de energía la hace por lo general con cambios en los valores de voltajes y corrientes.

2.1.1. Inducción mutua y autoinducción

La variación de la intensidad de corriente en una bobina da lugar a un campo magnético variable, este campo magnético origina un flujo magnético también variable que atraviesa otra bobina e induce en ella una fuerza electromotriz. Cualquiera de las bobinas puede ser el elemento inductor y cualquiera el elemento inducido, de ahí el calificativo de inducción mutua que recibe este fenómeno de inducción.

El fenómeno de la autoinducción, como su nombre indica, consiste en una inducción de la propia corriente sobre sí misma. Una bobina por la que circula una corriente variable puede considerarse atravesada por un flujo también variable debido a su propio campo magnético, lo que dará lugar a una fuerza electromotriz autoinducida, que se representa por la letra griega “ ϵ ”.

2.1.2 Principio de funcionamiento del transformador

Sustancialmente se puede decir que un transformador está constituido por un núcleo de material magnético que forma un circuito magnético cerrado, en cuyas columnas se localizan dos devanados, uno denominado “primario” que recibe la energía y el otro el secundario, que se cierra sobre un circuito de utilización al cual entrega la energía, los dos devanados se encuentran eléctricamente aislado entre sí.

Un voltaje se induce, ya sea cuando una bobina se mueve a través de un campo magnético o bien cuando el campo en movimiento corta una bobina estacionaria. Este mismo principio es válido para el transformador, solo que en este caso las bobinas y el circuito magnético son estacionarios (no tienen movimiento), en tanto que el flujo magnético cambio continuamente.

El cambio en el flujo se puede obtener aplicando una corriente alterna en al bobina. La corriente, a través de la bobina, varía en magnitud con el tiempo, y por lo tanto, el flujo producido por esta corriente, varia también en magnitud con el tiempo.

Cuando al devanado primario se le aplica una fuerza electromotriz alterna, el flujo magnético variable que produce atraviesa tanto al primario como al secundario. Si N_1 es el número de espiras del primario y N_2 del secundario, de acuerdo con la ley de Faraday-Henry, resultará para el primario la fuerza electromotriz autoinducida:

$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

Ec. 3

Donde:

ε = Fuerza electromotriz autoinducida

$d\phi/dt$ = Cambio de flujo magnético con respecto al tiempo

Y para el secundario la fuerza electromotriz inducida por el primario queda:

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \text{Ec. 4}$$

La presencia del núcleo de hierro evita la dispersión del flujo magnético, por lo que puede aceptarse que es igual en ambos casos, combinando las ecuaciones resulta:

$$\frac{\varepsilon_1}{N_1} = \frac{\varepsilon_2}{N_2} \quad \text{Ec. 5}$$

Esta expresión puede escribirse para un transformador ideal en la forma:

$$\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2} \quad \text{Ec. 6}$$

El cociente N_1/N_2 recibe el nombre de relación de transformación, según sea la transformación deseada, así habrá de ser la relación entre el número de espiras de los dos arrollamientos. En los transformadores elevadores ($V_1 < V_2$) el número de espiras del primario ha de ser menor que el del secundario y la relación de transformación resulta menor que la unidad. En los transformadores reductores ($V_1 > V_2$) sucede lo contrario.

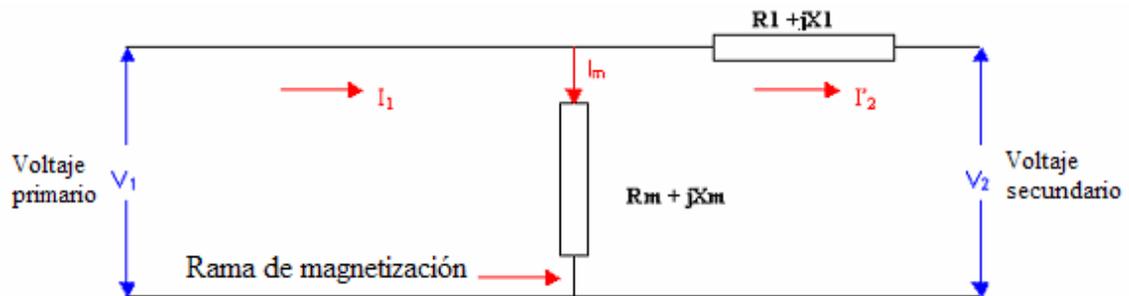
2.1.3 Determinación las constantes del transformador

Los valores reales de resistencia y reactancia de los devanados de un transformador, se pueden obtener de pruebas de laboratorios mediante mediciones y algunos cálculos relativamente simples y que son la base de los valores usados en los circuitos equivalentes. Algunos de estos valores o parámetros del transformador pueden no existir físicamente, pero pueden ayudar a comprender la operación del transformador.

2.1.3.1 Prueba de vacío

Consiste en aplicar una tensión nominal V_1 en cualquiera de los enrollados del transformador, con el otro enrollado abierto, se le aplica al lado 1 voltaje y frecuencia nominal, registrándose las lecturas de la potencia en vacío P_0 y la corriente en vacío I_1 .

Figura 9. Circuito equivalente para la condición en vacío



Es obvio que los únicos parámetros que tienen que ser considerados en la prueba de vacío son R_m y jX_m . La impedancia de dispersión $R_1 + jX_1$ no afecta a los datos de prueba. Usualmente, la tensión nominal se aplica al enrollado de baja tensión.

Nuestros parámetros nos quedan:

$$R_m = \frac{V_1^2}{P_0} \quad \text{Ec.7}$$

$$X_m = \frac{V_1}{I_m} \quad \text{Ec.8}$$

Donde:

V_1 = Voltaje primario

R_m = Conductancia de pérdidas

P_0 = Potencia en vacío

jX_m = Susceptancia inductiva

R_1 = Resistencia del primario

jX_1 = Reactancia de dispersión

I_m = Corriente de magnetización

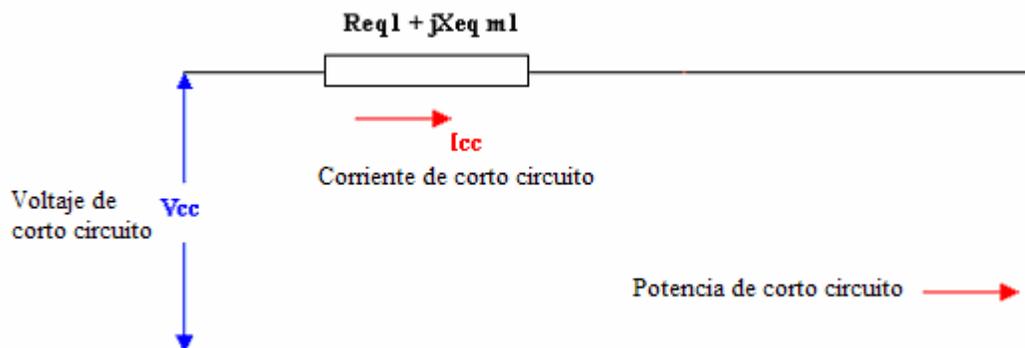
Es válido mencionar que I_m se calcula con:

$$I_m = \sqrt{I_1^2 - \left(\frac{V_1}{R_m}\right)^2} \quad \text{Ec. 9}$$

2.1.3.2 prueba de cortocircuito

Esta prueba se realiza a voltaje reducido, hasta que circule una corriente nominal por el circuito. En este caso no se toma la rama de magnetización, por lo tanto la densidad de flujo en el núcleo será pequeña en la prueba de cortocircuito, las pérdidas en el núcleo y la corriente de magnetización será todavía más pequeña. La tensión reducida V_{cc} , llamada frecuentemente tensión de corto circuito, se elige para que la corriente de cortocircuito I_{cc} no ocasione daño en los enrollamientos. Se escoge usualmente I_{cc} como la corriente de plena carga (nominal). Usualmente esta prueba se hace por el lado de alto voltaje, para que la corriente sea más pequeña.

Figura 10. Circuito equivalente para la condición de cortocircuito



Nota: La potencia del cortocircuito es la pérdida total en el cobre del transformador.

De la figura 10, obtenemos lo siguiente:

$$Z_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad \text{Ec.10}$$

$$R_{eq} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad \text{Ec.11}$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} \quad \text{Ec.12}$$

Donde:

V_{cc} = Voltaje de corto circuito

I_{cc} = Corriente de corto circuito

Z_{cc} = impedancia de corto circuito

R_{cc} = Resistencia de corto circuito

Además, Z_{eq} , X_{eq} y R_{eq} son conocidas por impedancia equivalente, reactancia equivalente y resistencia equivalente, respectivamente.

Debido a que la tensión aplicada es pequeña en comparación con la tensión nominal, las pérdidas en el núcleo se pueden considerar como despreciables, de manera que toda la potencia absorbida es debida a las pérdidas por efecto joule en los devanados primario y secundario.

2.1.4 Regulación del transformador

La regulación de un transformador se define como la diferencia entre los voltajes secundarios en vacío y a plena carga, medidos en terminales, expresada esta diferencia como un porcentaje del voltaje a plena carga, para el cálculo del voltaje en vacío se debe tomar en consideración el factor de potencia de la carga.

$$\% \text{ Reg.} = \frac{V_{\text{vacío}} - V_{\text{carga}}}{V_{\text{carga}}} \times 100 \quad \text{Ec. 13}$$

2.1.5 Eficiencia del transformador

La ecuación que representa la eficiencia del transformador es:

$$\eta = \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{ent}}} \times 100\%$$
$$= \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{sal}} + P_{\text{pérdida}}} \times 100\%$$

Donde:

η = Eficiencia

P_{sal} = Potencia de salida

P_{ent} = Potencia de entrada

$P_{\text{pérdida}}$ = Potencia de pérdidas

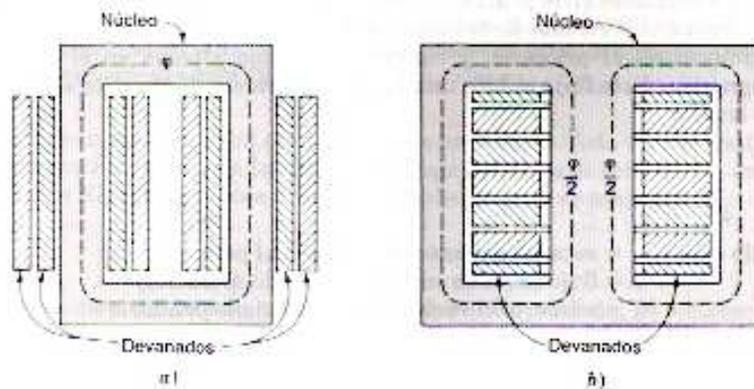
Un transformador tiene dos conceptos de eficiencia, una global para condición de plena carga y otro para distintas cargas al día, es decir, la llamada eficiencia diaria. Esta eficiencia diaria se expresa como la relación de energía salida-entrada durante el período de 24 horas.

2.1.6 Tipos de núcleos

Los núcleos para transformadores se agrupan básicamente en las siguientes categorías:

- ☑ Tipo núcleo o de columnas.
- ☑ Tipo acorazado.

Figura 11. Tipos de núcleos, a) Tipo columna, b) Tipo acorazado



Fuente: Fitzgerald, Kingsley Jr. Umans, Maquinas Eléctricas, Pág. 57

2.1.7 Herrajes o armadura

Los núcleos de los transformadores tienen partes que cumplen con funciones puramente mecánicas de sujeción de las laminaciones y estructuras, estas partes o elementos se conocen como "herrajes" o armadura y se complementan con componentes como fibra de vidrio o madera para protección de la sujeción de los yugos.

2.2 Circuitos equivalentes

2.2.1 Transformador ideal

Un transformador ideal es un artefacto sin pérdidas, con una bobina de entrada y una bobina de salida.

Figura 12. Esquema de un transformador ideal

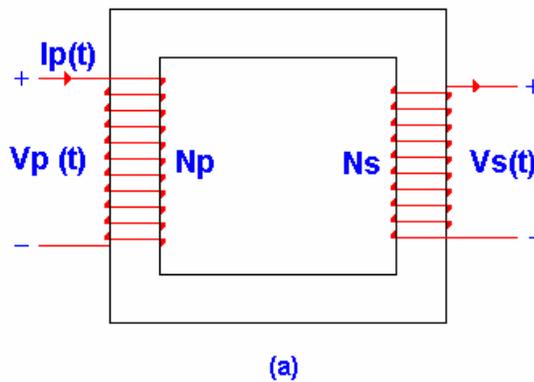
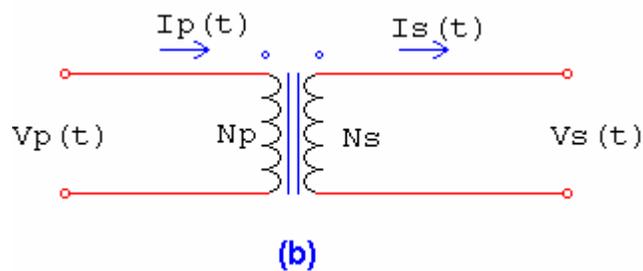


Figura 13. Símbolo esquemático de un transformador ideal



La relación entre el voltaje aplicado al lado primario del transformador y el voltaje inducido sobre su lado secundario es:

$$V_p / V_s = a \quad \text{Ec. 15}$$

La relación entre la corriente que fluye en el lado primario del transformador y la corriente que fluye hacia fuera del lado secundario del transformador es:

$$I_P / I_S = 1 / a \quad \text{Ec. 16}$$

En donde a se define como la relación de espiras del transformador

$$a = N_P / N_S \quad \text{Ec. 17}$$

Las ecuaciones anteriores describen la relación entre las magnitudes y los ángulos de los voltajes y las corrientes sobre los lados primarios y secundarios del transformador.

2.2.1.1 Potencia en un transformador ideal

La potencia suministrada al transformador por el circuito primario se expresa por medio de la ecuación

$$P_{\text{ent}} = V_P * I_P * \cos \theta_P \quad \text{Ec. 18}$$

En donde θ_P es el ángulo entre el voltaje y la corriente secundaria. La potencia que el circuito secundario suministra a sus cargas se establece por la ecuación:

$$P_{\text{sal}} = V_S * I_S * \cos \theta_S \quad \text{Ec. 19}$$

En donde θ_S es el ángulo entre el voltaje y la corriente secundarios. Puesto que los ángulos entre el voltaje y la corriente no se afectan en un transformador ideal, $\theta_P = \theta_S = \theta$. Aplicando las ecuaciones de relación de espiras nos resulta que:

$$P_{\text{sal}} = P_{\text{ent}} \quad \text{Ec. 20}$$

De donde, la potencia de salida de un transformador ideal es igual a su potencia de entrada. La misma relación se aplica a la potencia reactiva Q y la potencia aparente S .

2.2.2 Transformador real

Un transformador real es aquel en el cual se representan las pérdidas, es decir que es la unión de un transformador ideal y los efectos de las pérdidas, en este transformador, aunque hay un buen acoplamiento debido al núcleo de hierro, además del flujo mutuo, se producen unos pequeños flujos de dispersión en los arrollamientos del primario y del secundario.

El flujo de dispersión primario, produce una reactancia inductiva primaria. El flujo de dispersión secundario, produce una reactancia inductiva secundaria. Además, los arrollamientos del primario y del secundario están devanados con cobre que tiene una cierta resistencia.

Las resistencias y reactancias de los arrollamientos del primario y del secundario, respectivamente, producen caídas de tensión dentro del transformador como resultado de las corrientes del primario y del secundario. Aunque estas caídas de tensión son internas, es conveniente representarlas externamente en serie con un transformador ideal. Como se trata de caídas de tensión inductivas, podemos decir que la *impedancia interna primaria* del transformador es:

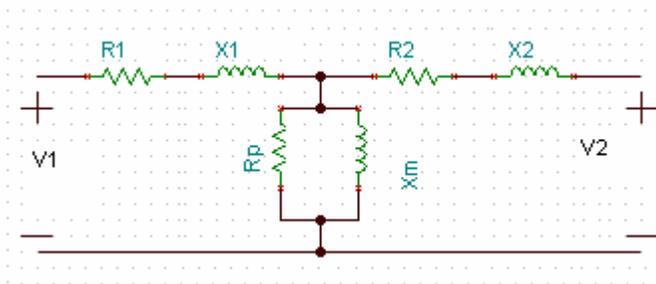
$$Z_1 = r_1 + jX_{L1} \quad \text{Ec. 21}$$

Y la *impedancia interna del secundario* del transformador es:

$$Z_2 = r_2 + jX_{l2} \quad \text{Ec. 22}$$

2.2.2.1 Circuito equivalente para un transformador real

Figura 14. Símbolo esquemático de un transformador real



Donde:

V1= Voltaje primario

R1= resistencia devanado primario

X1= Reactancia de dispersión del primario

Rp= Conductancia de perdidas

Xm= Suceptancia inductiva

R2= resistencia devanado secundario

X1= Reactancia de dispersión del secundario

V2= Voltaje secundario

Las comparaciones evidencian la posibilidad de utilizar transformaciones de impedancia para obtener un circuito equivalente del transformador real. Tal circuito equivalente es útil para la resolución de problemas relacionados con el rendimiento y la regulación de tensión de un transformador.

El circuito puede verse con la impedancia de carga y la resistencia y reactancia interna del secundario referidas al primario. La representación del transformador que satisface tanto la condición de carga como la de vacío. Es posible obtener un circuito equivalente aproximado colocando directamente la rama en paralelo L-R. A los bornes de la alimentación, V1, esto nos permite agrupar las resistencias y reactancias internas de los circuitos primario y secundario, respectivamente.

La figura 14 permite establecer algunas consideraciones en las que interviene el rendimiento del transformador y la regulación de tensión, así como el cálculo de la corriente del primario y del secundario.

2.2.2.2 Aplicación de los circuitos equivalentes

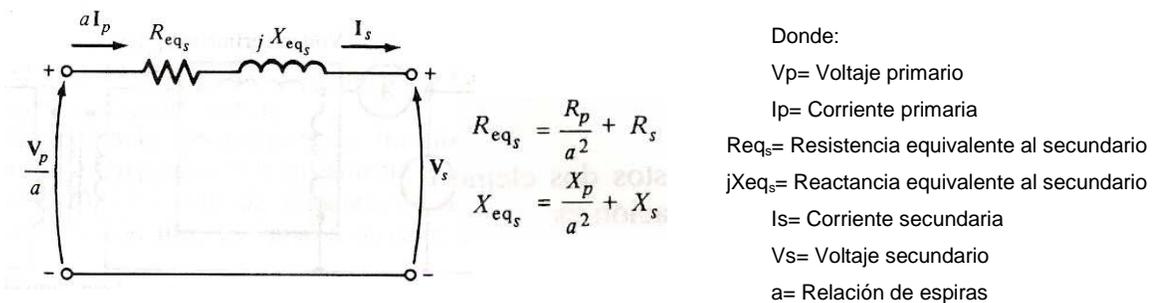
Se aplican cuando los transformadores se usan dentro de una red compleja, para estudiar el comportamiento por lo que se refiere a la distribución de la carga, las caídas de tensión, el corto circuito, etc.

Algunos estudios, no se requiere considerar los efectos de la saturación del núcleo del transformador y son despreciables, es conveniente hacer referencia a los valores de tensiones y corrientes referidos a un devanado a un lado del transformador.

2.3 Diagramas fasoriales del transformador

El *diagrama fasorial*, es un esquema de los voltajes y corrientes fasoriales del transformador, es la forma más fácil de determinar el efecto de la impedancia y de los ángulos de fase de la corriente circundante en la regulación de voltaje del transformador. En los diagramas fasoriales siguientes, el voltaje fasorial V_s se supone con un ángulo de 0° y todos los demás voltajes y corrientes se comparan con dicha suposición, aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff al circuito equivalente del transformador.

Figura15. Circuito equivalente del transformador referido al secundario, sin rama de excitación



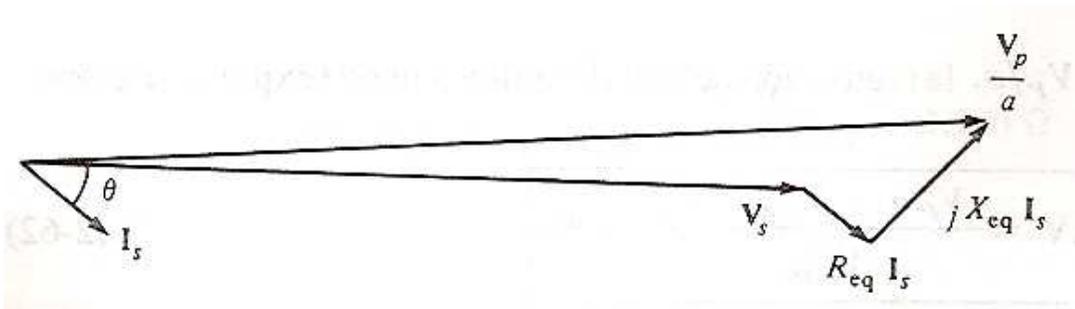
Fuente: J. Chapman, Maquinas Eléctricas

El voltaje primario queda:

$$\frac{V_P}{a} = V_S + R_{eq} I_S + jX_{eq} I_S \quad \text{Ec. 23}$$

Un diagrama fasorial de un transformador es una representación visual de esta ecuación.

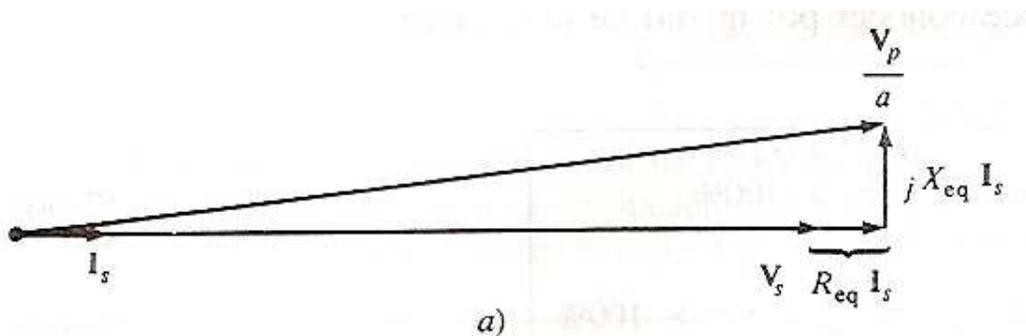
Figura 16. Diagrama fasorial de un transformador que trabaja con un factor de potencia en atraso



Fuente: Stephen J. Chapman, Maquinas Eléctricas, Pág. 84

Es muy fácil ver que $V_p/a > V_s$ para cargas en atraso, así que la regulación del voltaje de un transformador con tales cargas debe ser mayor que cero.

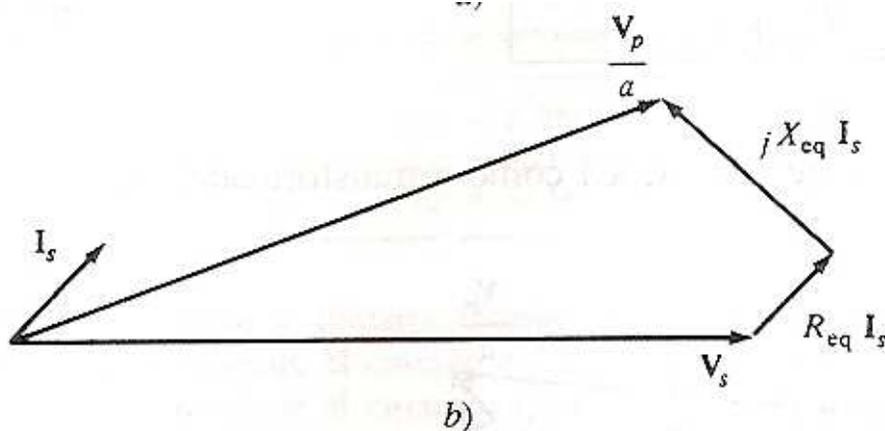
Figura 17. Diagrama fasorial de un transformador que trabaja con un factor de potencia unitario



Fuente: Stephen J. Chapman, Maquinas Eléctricas, Pág. 85

Aquí nuevamente se ve que el voltaje secundario es menor que el primario, de donde $V_R > 0$. Sin embargo, en esta oportunidad la regulación de voltaje es un número más pequeño que el que tenía con una corriente de atraso.

Figura 18. Diagrama fasorial de un transformador que trabaja con un factor de potencia en adelanto



Fuente: Stephen J. Chapman, Maquinas Eléctricas, Pág. 85

En la figura 17, si la corriente secundaria esta adelantada, el voltaje secundario puede ser realmente mayor que el voltaje primario referido. Si esto sucede, el transformador tiene una regulación de voltaje negativa.

2.4 Conexiones de los transformadores

2.4.1 El concepto de polaridad

La polaridad da la dirección relativa en la cual los devanados primarios y secundarios de un transformador se devanan alrededor del núcleo, esto determina la dirección relativa del voltaje a través de los devanados, dependiendo de la dirección relativa de los devanados.

2.4.2. Polaridad en un transformador

Dado que es importante, cuando dos o más transformadores se conectan juntos, conocer la dirección relativa del voltaje y corriente de cada transformador, se han establecido ciertas convenciones para designar la polaridad de un transformador, estas se clasifican en:

- Polaridad aditiva.
- Polaridad sustractiva.

Si los devanados de los lados de alto y bajo voltaje están en direcciones opuestas, los voltajes aplicado e inducido tendrán direcciones opuestas y se dice que el transformador tiene “polaridad sustractiva”.

Si los devanados de los lados de alto y bajo voltaje están en la misma dirección, los voltajes aplicado e inducido tendrán la misma dirección y se dice entonces que el transformador tiene “polaridad aditiva”.

En general si el voltaje es la suma, se dice que el transformador tiene polaridad *aditiva* y si es la diferencia, entonces se dice que tiene polaridad *sustractiva*.

2.4.3 Sistemas polifásicos

Como se sabe, en corriente alterna hay dos tipos de circuitos: los denominados circuitos monofásicos y los circuitos polifásicos (los más comunes son los trifásicos). En los circuitos monofásicos sólo una fase o voltaje, de onda de forma senoidal, se aplican a los circuitos.

En un sistema polifásico se aplican dos o más voltajes senoidales a las diferentes partes del circuito y circulan en las mismas partes las correspondientes corrientes senoidales.

Cada parte del sistema polifásico se conoce como “fase” y prácticamente se denominan fase A, fase B Y fase C y en la misma forma se designan los voltajes y las corrientes.

Los voltajes aplicados a un sistema polifásico se obtienen de una fuente de suministro polifásica, también, de manera que cada fase está siempre separada, por ejemplo, en un sistema trifásico se tienen tres fases separadas.

Los voltajes a través de los devanados 1, 2 y 3 en los dos sistemas, no sólo son de diferente magnitud, también se observa que sus direcciones no coinciden. Este hecho es importante en la conexión de transformadores, ya que puede provocar dificultades en al conexión de transformadores cuando no se tiene cuidado en esto.

2.4.4 Transformadores trifásicos

En términos generales, un banco formado por tres transformadores monofásicos, se puede reemplazar por un transformador trifásico. Estos transformadores trifásicos, tienen un núcleo magnético con tres piernas, en donde se alojan los devanados primario y secundario de cada una de las fases. Los devanados se conectan internamente, en forma similar a los bancos de transformadores monofásicos, en cualquiera de las conexiones trifásicas, es decir, estrella o delta.

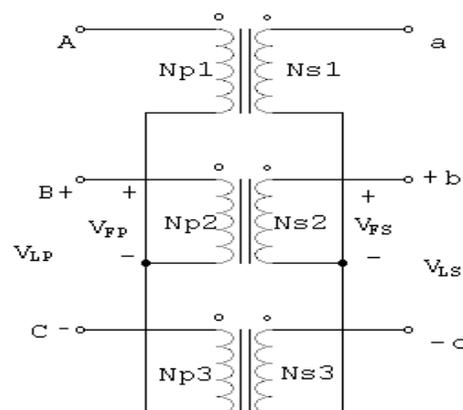
Para una capacidad dada, un transformador trifásico es siempre de menor tamaño y más barato que un banco formado por tres transformadores monofásicos con la misma capacidad. En algunas ocasiones, aun con lo mencionado antes, se prefiere el uso de bancos de transformadores monofásicos, especialmente cuando por mantenimiento y confiabilidad resulta importante la facilidad para reemplazar a una de las unidades.

2.4.5 Conexiones de transformador trifásico

Un transformador trifásico consta de tres transformadores monofásicos, bien separados o combinados sobre un núcleo. Los primarios y secundarios de cualquier transformador trifásico pueden conectarse independientemente en estrella Y o en delta (Δ). Esto da lugar a cuatro conexiones posibles para un transformador trifásico.

2.4.5.1 Conexión estrella (Y)- estrella (Y)

Figura 19. Conexión Y-Y



Fuente: Máquinas Eléctricas y transformadores. Edwin Kosow

Esta conexión se usa cuando se requiere alimentar grandes cargas monofásicas en forma simultánea, con cargas trifásicas. También se usa sólo si el neutro del primario se puede conectar sólidamente al neutro de la fuente de alimentación o a tierra. Cuando los neutros de ambos lados del banco de transformadores no se unen, el voltaje de línea a neutro tiende a distorsionarse.

Se emplea en sistemas con tensiones muy elevadas, ya que disminuye la capacidad de aislamiento. Esta conexión tiene dos serias desventajas.

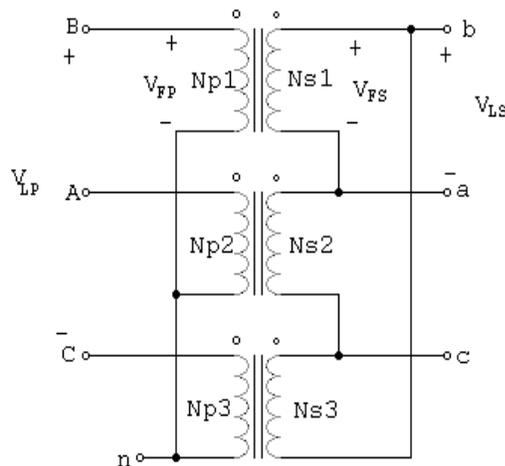
- Si las cargas en el circuito del transformador están desbalanceadas, entonces los voltajes en las fases del transformador se desbalancearán seriamente.
- No presenta oposición a los armónicos impares (especialmente el tercero). Debido a esto la tensión del tercer armónico puede ser mayor que el mismo voltaje fundamental.

Ambos problemas del desbalance y el problema del tercer armónico, pueden resolverse usando alguna de las dos técnicas que se esbozan a continuación.

- *Conectar sólidamente a tierra el neutro primario de los transformadores:* Esto permite que los componentes del tercer armónico, causen un flujo de corriente en el neutro, en lugar de causar gran aumento en los voltajes. El neutro también proporciona un recorrido de retorno a cualquier corriente desbalanceada en la carga.
- *Agregar un tercer embobinado (terciario) conectado en delta al grupo de transformadores:* Esto permite que se origine un flujo de corriente circulatoria dentro del embobinado, permitiendo que se eliminen los componentes del tercer armónico del voltaje.

2.4.5.2 Conexión estrella (Y)- delta (Δ)

Figura 20. Conexión Y- Δ



Fuente: Máquinas Eléctricas y transformadores. Edwin Kosow

Esta conexión se usa con frecuencia para alimentar cargas trifásicas grandes. Tiene la limitante de que para alimentar cargas monofásicas y trifásicas en forma simultánea, no dispone del neutro.

Por otra parte, tiene la ventaja relativa de que la impedancia de los tres transformadores no necesita ser la misma en esta conexión.

La conexión Y- Δ no tiene problema con los componentes del tercer armónico en sus voltajes, ya que ellos se consumen en la corriente circulatoria del lado delta (Δ). Esta conexión también es más estable con relación a las cargas desbalanceadas, puesto que la delta (Δ) redistribuye parcialmente cualquier desbalance que se presente.

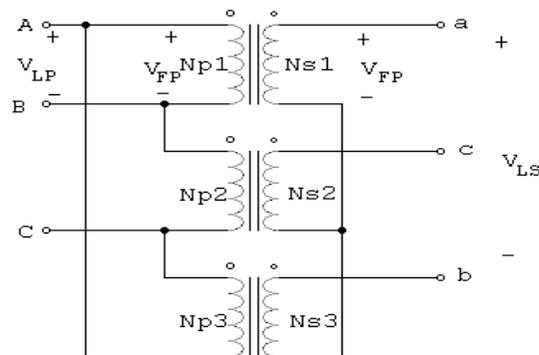
Esta disposición tiene, sin embargo, un problema, en razón de la conexión delta (Δ), el voltaje secundario se desplaza 30° con relación al voltaje primario del transformador. El hecho de que un desplazamiento de la fase haya ocurrido puede causar problemas al conectar en paralelo los secundarios de dos grupos de transformadores, ya que los ángulos de fase de los transformadores secundarios deben ser iguales si se van a conectar en paralelo.

La conexión que se muestra en la figura 19 hará que el voltaje secundario se atrase, si la secuencia es ABC. Si la secuencia del sistema fase es ACB, entonces la conexión que se ve en la figura hará que el voltaje secundario se adelante al voltaje primario en 30° .

Se usa en los sistemas de transmisión de las subestaciones receptoras cuya función es reducir el voltaje. En sistemas de distribución es poco usual ya que no tiene neutro.

2.4.5.3 Conexión delta (Δ)- estrella (Y)

Figura 21. Conexión Δ -Y

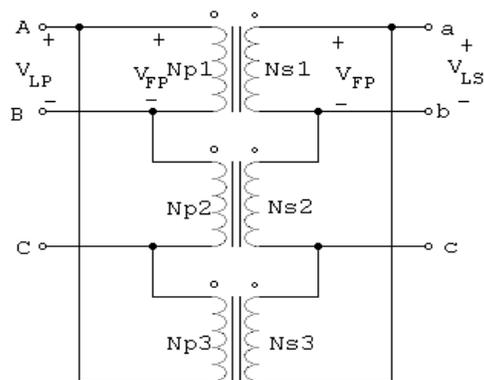


Fuente: Máquinas Eléctricas y transformadores. Edwin Kosow

Esta conexión tiene las mismas ventajas y el mismo desplazamiento de fase que el transformador Y- Δ . La conexión que se ilustra en la figura 20, hace que el voltaje secundario atrase el primario en 30° , tal como sucedió antes. Esta conexión se usa en los sistemas de transmisión en los que es necesario elevar tensiones de generación, en sistemas de distribución industrial, su uso es conveniente debido a que se tiene acceso a dos tensiones distintas, de fase y línea.

2.4.5.4 Conexión delta (Δ)- delta (Δ)

Figura 22. Conexión Δ - Δ



Fuente: Máquinas Eléctricas y transformadores. Edwin Kosow

Esta conexión se utiliza frecuentemente para alimentar sistemas de alumbrado monofásicos y carga de potencia trifásica simultáneamente, presenta la ventaja de poder conectar los devanados primario y secundario sin desfasamiento, y no tiene problemas de cargas desbalanceadas o armónicas. Sin embargo, circulan altas corrientes a menos que todos los transformadores sean conectados con el mismo tap de regulación y tengan la misma razón de tensión.

2.4.6 Conexión delta abierta-delta abierta

La conexión delta-delta representa en cierto modo la más flexible de las conexiones trifásicas. Una de las ventajas de esta conexión, es que si uno de los transformadores se daña o se retira de servicio, los otros dos pueden continuar operando en la llamada conexión “delta-abierta” o “V”. Con esta conexión se suministra aproximadamente el 58% de la potencia que entrega un banco en conexión delta-delta.

La conexión delta abierta, se usa normalmente para condiciones de emergencia, cuando en una conexión delta-delta uno de los transformadores del banco se desconecta por alguna razón. En forma similar a la conexión delta-delta, del punto medio del secundario de uno de los transformadores se puede tomar una derivación para alimentar pequeñas cargas de alumbrado o bien otros tipos de cargas.

2.4.7 Conexión de transformadores en paralelo

Los transformadores se pueden conectar en paralelo por distintas razones, las principales están relacionadas con problemas de confiabilidad y de incremento en la demanda, cuando se excede o se está a punto de exceder la capacidad de un transformador ya en operación. Para conectar los transformadores en paralelo y garantizar su correcta operación, se deben cumplir ciertas condiciones como son:

- Deben tener los mismos voltajes primarios y secundarios.
- Deben tener los mismo valor de impedancia expresado en por ciento o en por unidad.
- Se debe verificar que la polaridad de los transformadores sea la misma.

2.5 Pruebas a transformadores

2.5.1 Descripción de pruebas a los transformadores

Estas se hacen para conocer el estado de sus componentes y poder tomar decisiones oportunas que garanticen la continuidad de servicio de las instalaciones, es preciso someter a los transformadores eléctricos a programas de mantenimiento, cuyos resultados determinarán la decisión a tomar sobre: La operación, reposición de elementos (principalmente del aceite), o reparación mayor.

Las pruebas que se ejecutan en los transformadores pueden dividirse en:

1. Pruebas del aceite o líquido dieléctrico
2. Pruebas del aislamiento
3. Pruebas de los devanados

Algunas de las pruebas que se hacen en los transformadores se consideran como básicas y algunas otras varían de acuerdo a la condición individual de los transformadores y pueden cambiar de acuerdo al tipo de transformador, por lo que existen distintas formas de clasificación de las pruebas a transformadores, por ejemplo se pueden agrupar como pruebas preliminares, intermedias y de verificación (Finales).

Las pruebas preliminares se realizan cuando un transformador se ha puesto fuera de servicio para mantenimiento programado o para revisión programada o bien ha tenido alguna falla. Las pruebas se realizan antes de “abrir” el transformador y tienen el propósito general de encontrar el tipo y naturaleza de la falla, las llamadas pruebas preliminares incluyen:

- Medición de la resistencia de aislamiento de los devanados.
- Medición de la resistencia ohmica de los devanados.
- Determinación de las características del aislamiento.

Las llamadas pruebas intermedias, como su nombre lo indican se realizan durante el transcurso de una reparación o bien en las etapas intermedias de la fabricación, cuando el transformador está en proceso de armado o bien desarmado (según sea el caso) y el tipo de pruebas depende del propósito de la reparación o la etapa de fabricación, por lo general se hacen cuando las bobinas no han sido montadas o desmontadas y son principalmente las siguientes:

- Resistencia de aislamiento de tornillos y herrajes contra el núcleo.
- Resistencia de aislamiento de tornillos y herrajes por voltaje aplicado.
- Prueba de las boquillas por medio de voltajes aplicado.

Las pruebas finales se hacen sobre transformadores terminados de fabricación o armados totalmente después de una reparación e incluyen las siguientes:

- Prueba al aceite del transformador.
- Medición de la resistencia de aislamiento.
- Prueba de relación de transformación.
- Determinación del desplazamiento de fase de los grupos de bobinas.
- Determinación de las características del aislamiento.
- Prueba del aislamiento por voltaje aplicado.
- Prueba para la determinación de las pérdidas en vacío y en corto circuito (determinación de impedancia).
- Prueba del aislamiento entre espiras por voltaje inducido.
- Medición de la corriente de vacío y la corriente de excitación.

2.5.2 Pruebas al aceite del transformador

Las pruebas que proporcionan elementos de juicio más ciertos por lo que al aceite se refiere son:

- Prueba, de rigidez dieléctrica
- De acidez
- De compuestos polares
- De factor de potencia
- De envejecimiento
- De contenido de agua
- De tensión interfacial
- De color

En el área de campo la condición del aceite se puede determinar por una prueba que compara el color de una muestra de aceite del transformador bajo prueba, con un conjunto o panel de colores de referencia que dan un indicación de la emulsificación que puede tener lugar, de hecho esta prueba sirve para verificar el grado de oxidación de la aceite y debe marcar 0.5 para aceites nuevos y 5 máximo para aceites usados, en el rango de color amarillo, naranja y rojo indican que el transformador puede tener daños severos.

2.5.2.1 Prueba de rigidez dieléctrica del aceite

Esta se realiza en un aparato denominado probador de rigidez dieléctrica del aceite. La muestra de aceite se toma en un recipiente de vidrio por medio de la válvula de drenaje del transformador y luego se vacía en un recipiente denominado “copa estándar” que tiene dos electrodos que pueden ser planos o esféricos y cuyo diámetro y separación está normalizado de acuerdo al tipo de prueba.

El voltaje aplicado entre electrodos se hace por medio de un transformador regulador integrado al propio aparato probador. Después de llenada la copa estándar se debe esperar alrededor de 20 minutos para permitir que se eliminen las burbujas de aire del aceite antes de aplicar el voltaje; El voltaje se eleva gradualmente por medio de la perilla o manija del regulador de voltaje, la tensión o voltaje se ruptura se mide por medio de un voltímetro graduado en kilovolts.

Existen de acuerdo, distintos criterios de prueba, pero en general se puede afirmar que se pueden aplicar seis rupturas dieléctricas con intervalos de 10 minutos, el primero no se toma en cuenta, y el promedio de las otras cinco se toma como la tensión de ruptura o rigidez dieléctrica, normalmente la rigidez dieléctrica en los aceites aislantes se debe comportar en la forma siguiente:

Aceites degradados y contaminados	De 10 a 28 kV
Aceites carbonizados no degradados	De 28 a 33 kV
Aceites Nuevo sin desgasificar	De 33 a 44 kV
Aceite Nuevo desgasificado	De 40 a 50 kV
Aceite regenerado	De 50 a 60 kV

2.5.3 Prueba de resistencia de aislamiento

La prueba de resistencia de aislamiento en transformadores sirve no solo para verificar la calidad del aislamiento en transformadores, también permite verificar el grado de humedad y en ocasiones defectos severos en el aislamiento. La resistencia de aislamiento se mide por medio de un aparato conocido como “megger”.

El megger consiste de una fuente de alimentación en corriente directa y un sistema de medición, la escala del instrumento está graduada para leer resistencias de aislamiento en el rango de 0 a 10,000 megaohms.

La resistencia de aislamiento de un transformador se mide entre los devanados conectados todos entre sí, contra el tanque conectado a tierra y entre cada devanado y el tanque, con el resto de los devanados conectados a tierra.

Para un transformador de dos devanados se deben tomar las siguientes medidas:

- Entre el devanado de alto voltaje y el tanque con el devanado de bajo voltaje conectado a tierra.
- Entre los devanados de alto voltaje y bajo voltaje conectado entre si, contra el tanque.

Estas mediciones se pueden expresar en forma sintetizada como:

Alto Voltaje Vs. Tanque + bajo voltaje a tierra.

Bajo voltaje Vs. Tanque + alto voltaje a tierra.

Alto voltaje + bajo voltaje Vs. Tanque a tierra.

3. MÁQUINAS ROTATIVAS DE CA

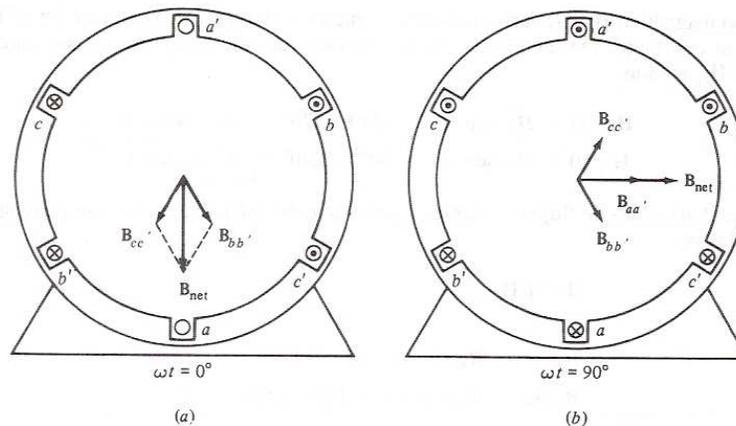
3.1 Conceptos básicos

3.1.1 Campo magnético giratorio

Supongamos tres grupos de bobinas conectadas en triángulo, formando entre sí ángulos iguales, cada grupo de bobinas se conecta a una fase de la corriente alterna, Como sabemos las corrientes trifásicas tienen distinta intensidad en cada fase y en cada momento que las consideramos, al estar las intensidades desfasadas entre sí 120 grados eléctricos en los tres devanados, los valores de los campos magnéticos generados también estarán desfasadas 120 grados,

Estos tres campos magnéticos existentes en cualquier instante, se combinarán para producir un campo magnético resultante, que va girando a medida que varía la intensidad de la corriente de las tres fases.

Figura 23. Vector de campo magnético resultante a, a) 0° y b) 90°



Fuente: Conversión De Energía Electromagnética. Vembu Gourishankar

Siguiendo el mismo razonamiento para las distintas posiciones sucesivas, se obtendría un campo magnético giratorio en el estator trifásico, que dará una vuelta por cada ciclo de la corriente alterna, es posible establecer la relación entre la frecuencia eléctrica con la velocidad mecánica resultante de los campos magnéticos, esta relación es

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

Ec. 24

Donde:

f_e = frecuencia eléctrica [Hz]

n_m = velocidad mecánica [Rpm]

P= numero de polos

120= 2x60 = (polos en pares) x (60 segundos)

3.1.2 Inversión de rotación del campo magnético

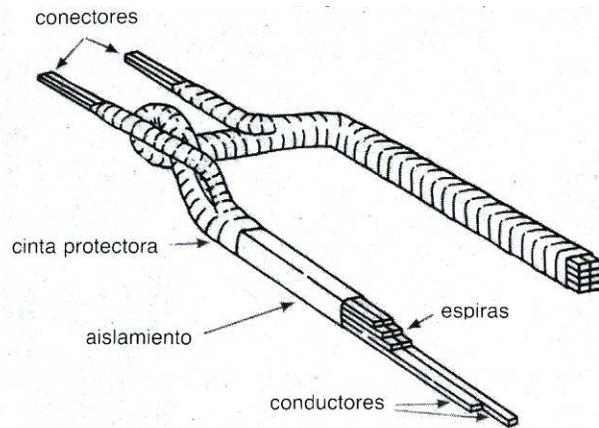
Si se intercambia la corriente en dos cualesquiera de las tres bobinas, la dirección de la rotación del campo magnético se invertirá. Esto significa que es posible invertir la dirección de rotación de un motor de CA intercambiando las conexiones en dos cualesquiera de las tres bobinas, esto hace que se cambie la secuencia de fase y el sentido de rotación del campo magnético.

3.1.3 Distribución de embobinados

Los estatores de las maquinas de CA constan de varias bobinas en cada fase, distribuidas en ranuras alrededor de la superficie interna del estator. En maquinas mas grandes, cada bobina es una unidad prefabricada que consta de una cantidad de espiras, cada una de estas espiras esta aislada de las demás y del propio estator, en cualquier espira individual el voltaje es muy pequeño, y solo pueden producirse voltajes razonables mediante la colocación de muchas de estas espiras en serie, normalmente la gran cantidad de espiras se divide físicamente entre varias bobinas, y estas se colocan en ranuras espaciadas de modo equidistante a lo largo de la superficie del estator.

El espacio medido en grados, entre ranuras adyacentes en un estator se llama ancho de ranura, este ancho puede estar dado en grados mecánicos o eléctricos.

Figura 24. Bobina de estator prefabricado



Fuente: General electric company, s.d.e

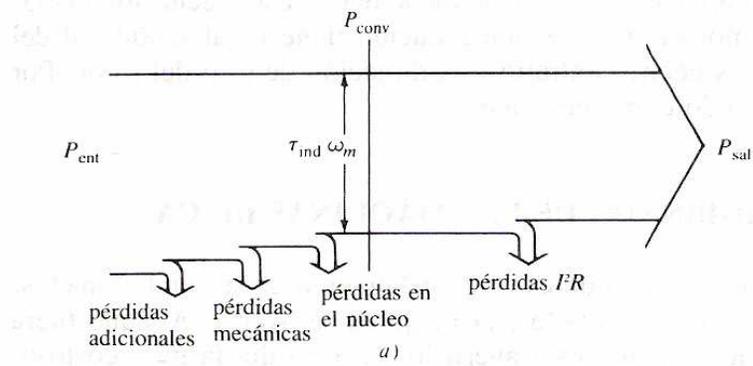
3.1.4 Generadores de corriente alterna

Un generador de corriente alterna o alternador, se diferencia de uno de corriente continua en sólo dos aspectos: los extremos de la bobina de su armadura están sacados a los anillos colectores sólidos sin segmentos del árbol del generador en lugar de los conmutadores, y las bobinas de campo se excitan mediante una fuente externa de corriente continua más que con el generador en sí.

La corriente que se genera mediante los alternadores se conoce como corriente alterna. Si se agrupan tres bobinas de armadura en ángulos de 120° , se producirá corriente en forma de onda triple, conocida como corriente alterna trifásica.

Se puede obtener un número mayor de fases incrementando el número de bobinas en la armadura, pero en la práctica de la ingeniería eléctrica moderna se usa sobre todo la corriente alterna trifásica, con el alternador trifásico, que es la máquina dinamoeléctrica que se emplea normalmente para generar potencia eléctrica.

Figura 25. Diagrama de potencia en un generador de CA



Fuente: Conversión De Energía Electromagnética. Vembu Gourishankar

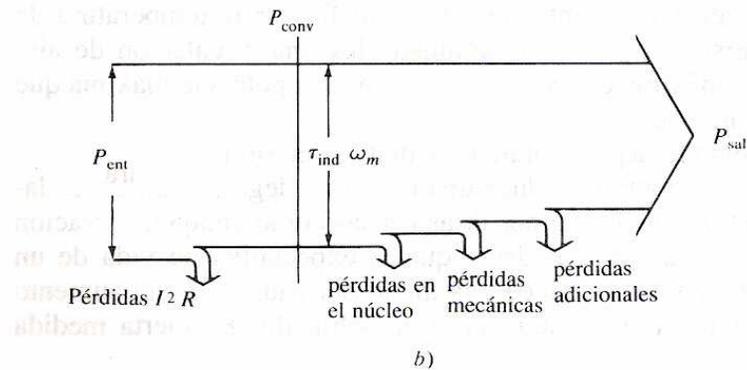
Este diagrama del flujo de potencia, nos sirven para poder visualizar como se va transfiriendo la potencia en un generador de CA.

3.1.5 Motores de corriente alterna

Se diseñan dos tipos básicos de motores para funcionar con corriente alterna polifásica: los motores síncronos y los motores de inducción o asíncronos. El motor síncrono es en esencia un alternador trifásico que funciona a la inversa. El más simple de todos los tipos de motores eléctricos es el motor de inducción que se usa con alimentación trifásica, en este motor la velocidad de rotación del rotor y la del campo difieren entre sí de un 2 a un 5%, esta diferencia de velocidad se conoce como caída o deslizamiento.

Los motores de repulsión-inducción se denominan así debido a que su par de arranque depende de la repulsión entre el rotor y el estator, y su par, mientras está en funcionamiento, depende de la inducción.

Figura 26. Diagrama de potencia de un motor de CA



Fuente: Conversión De Energía Electromagnética. Vembu Gourishankar

Se puede observar en la figura anterior, que están representadas las pérdidas que presentan los motores de ca, que son las mismas que representan las maquinas de cc, además se representa la potencia convertida o trasferida que aparece en los entrehierros del rotor y el estator.

3.2 Máquina síncrona

3.2.1 Generador síncrono

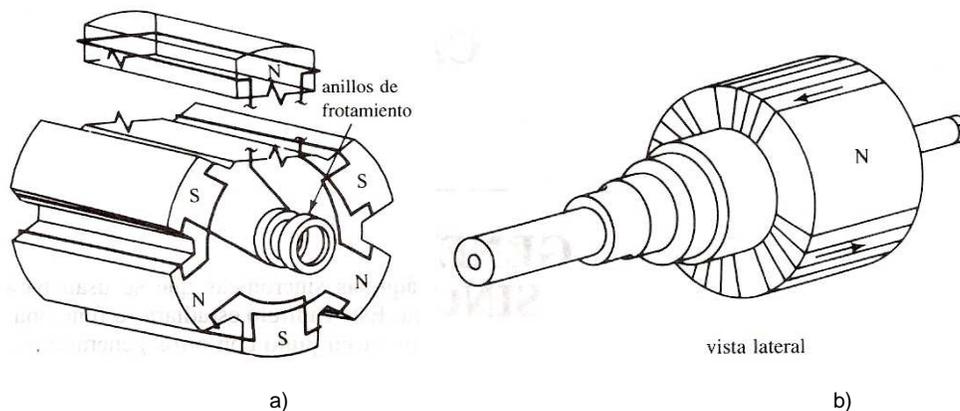
Un generador sincrónico o alternador es un dispositivo que convierte la potencia mecánica de un motor primario en potencia eléctrica de CA a un voltaje y frecuencia específicos. El término sincrónico se refiere al hecho de que la frecuencia eléctrica de esta máquina está atada o sincronizada con la velocidad de rotación de su eje. Los generadores sincrónicos se usan para producir la mayor parte de la potencia eléctrica que se usa en el mundo entero.

Los polos magnéticos del rotor de un generador sincrónico pueden ser de construcción:

- Polos salientes
- Polos no salientes

El termino saliente, significa protuberante o resaltado, y este es un polo magnético que resalta de la superficie del rotor, por otra parte un polo no saliente, es un polo magnético construido a ras de la superficie del rotor.

Figura 27. Rotor de a) polos saliente y b) polos no salientes



Fuente: Conversión De Energía Electromagnética. Vembu Gourishankar

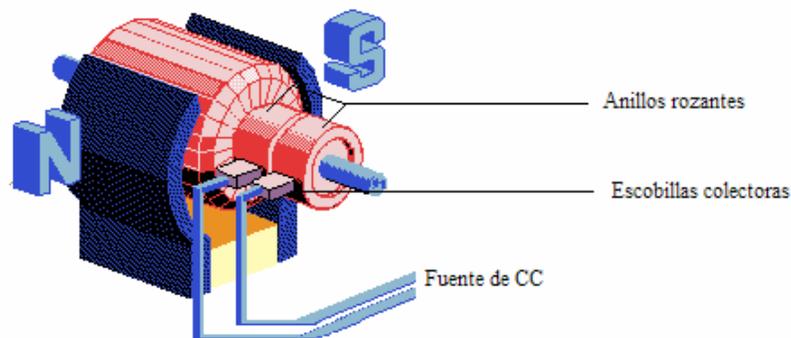
En un generador sincrónico, se aplica al embobinado del rotor una corriente continua, esto produce un campo magnético en el rotor, es decir que el rotor de un generador sincrónico es esencialmente un gran electroimán, entonces el rotor del generador se impulsa por medio de un motor primario, lo cual producirá un campo magnético giratorio dentro de la maquina, este campo magnético rotatorio, inducirá un sistema trifásico de voltajes dentro de los embobinados del estator. El voltaje generado internamente en la máquina depende de la velocidad de rotación de su eje y de la magnitud del flujo de campo.

Hay dos métodos para suministrar la corriente continua al rotor de generador:

1. Desde una fuente externa de CC, por medio de anillos de rozamiento y escobillas colectoras.
2. Desde una fuente especial de CC o excitatriz sin escobillas, montada directamente en el eje del generador.

Los anillos de rozamiento, son anillos metálicos que envuelven completamente el eje de la maquina, pero aislados de él. Cada extremo del embobinado del rotor está unido a cada uno de los dos anillos de rozamiento del eje de la maquina, y sobre cada anillo se coloca una escobilla, las cuales se conectan a la fuente de CC, así se suministrara el voltaje de CC a los embobinados del rotor, sin importar la posición angular o la velocidad del rotor.

Figura 28. Generador síncrono



Fuente: Conversión De Energía Electromagnética. Vembu Gourishankar

Una excitatriz sin escobilla es un generador pequeño de corriente alterna, el cual produce una salida trifásica, la cual se rectifica a corriente continua con un circuito rectificador trifásico, montado también sobre el eje del generador y luego inyectada al circuito de campo principal del generador.

Las marcaciones del motor primario y la corriente de campo, son los que controlan la frecuencia y el voltaje en terminales, respectivamente.

Cuando el generador se conecta con un barraje infinito, sus frecuencia y voltaje son fijos, de tal manera que las marcaciones del gobernador y la corriente de campo controlan los flujos de las potencias real y reactiva del generador. En los sistemas reales que emplean generadores de tamaños aproximadamente iguales, las marcaciones del gobernador afectan tanto al flujo de la frecuencia como al de la potencia y la corriente de campo afecta tanto la tensión en los bornes, como el flujo de potencia reactiva.

La capacidad de un generador sincrónico para producir potencia eléctrica está limitada primordialmente por el calentamiento dentro de la máquina, cuando los embobinados de la máquina se recalientan, la vida de la máquina se ve seriamente comprometida, como hay dos embobinados diferentes (de inducido y de campo).

Hay dos limitaciones distintas en el generador: el calentamiento máximo permitido de los embobinados del inducido determina los kilovoltamperios (KVA) máximos permitidos por la máquina y el calentamiento máximo permitido en los embobinados de campo determina el máximo del voltaje en terminales (KV).

3.2.1.1 Velocidad de un generador sincrónico

El sincronismo de un generador sincrónico, se refiere a que la frecuencia eléctrica que este produce está atada o sincronizada con la velocidad mecánica de rotación del eje del generador, que será la misma velocidad de rotación del campo magnético en la maquina.

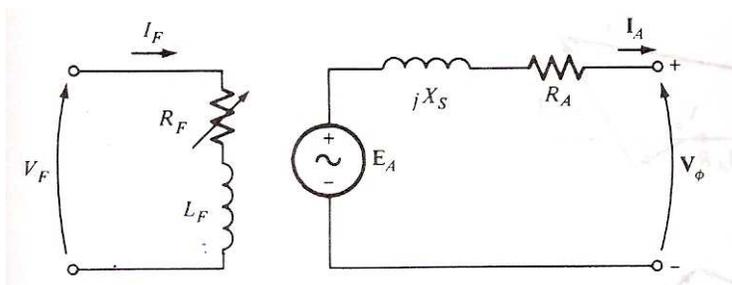
La relación entre la frecuencia eléctrica y la velocidad mecánica del campo se da por medio de la ecuación No. 24 del capítulo 3.1.1, en esta ecuación la velocidad mecánica del campo es la misma velocidad de rotación del eje del rotor.

3.2.1.2 Circuito equivalente de un generador síncrono

Se debe tener en cuenta que el voltaje generado internamente en el generador síncrono no es generalmente el voltaje que aparece en los terminales de este, la única ocasión en que estos voltajes son iguales es cuando no existe corriente del inducido o el generador trabaja en vacío, por lo demás los factores que causan la diferencia en estos voltajes son:

1. La distorsión del campo magnético del entrehierro de aire por la corriente que fluye en el estator, llamada reacción del inducido.
2. La auto inductancia de las bobinas del inducido.
3. La resistencia de las bobinas del inducido.
4. El efecto de las formas del rotor de polos salientes.

Figura 29. Circuito equivalente por fase de un generador síncrono



Donde:

V_f = voltaje de campo

R_f = resistencia de campo

I_f = corriente de campo

L_f = inductancia de campo

E_a = voltaje interno

jX_s = inductancia del inducido

R_a = resistencia de armadura

I_a = corriente de armadura

V_ϕ = voltaje de fase

Fuente: Fuente: Stephen J. Chapman, Maquinas Eléctricas

Se debe tener en presente que cuando se usa el circuito equivalente por fase, las tres fases tienen los mismos voltajes y corrientes, solamente cuando las cargas que se les conectan están balanceadas, ya que las tres fases del generador sincrónico son idénticas en todo, menos en el ángulo de fase.

3.2.2 Motores sincrónicos

Los motores sincrónicos son máquinas sincrónicas que se usan para convertir potencia eléctrica en potencia mecánica, un motor sincrónico es lo mismo que un generador sincrónico en todos sus aspectos, desde su construcción y su funcionamiento interno, con la diferencia que la dirección del flujo de potencia y la corriente en el estator, tienen sentido contrario.

Los motores sincrónicos suministran potencia mecánica a cargas que son básicamente aparatos de velocidad constantes, la velocidad de rotación está ligada a la frecuencia eléctrica, como en un generador sincrónico, por lo cual la velocidad será constante e independiente de la carga.

3.2.2.1 Arranque de motores sincrónicos

Un motor sincrónico no tiene un par de arranque neto y por ello no puede arrancar por sí mismo. Existen tres métodos básicos que pueden usarse para el arranque de motores sincrónicos en forma segura, y son:

1. Reducir la velocidad del campo magnético del estator hasta un valor suficientemente bajo como para que el rotor se pueda acelerar y enganchar con él durante medio ciclo de rotación del campo magnético, esto se puede hacer reduciendo la frecuencia de la potencia eléctrica.

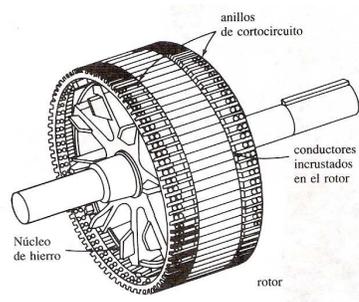
2. Usar un motor primario externo para acelerar el motor sincrónico hasta la velocidad de sincronismo, seguir el proceso para poner la maquina en línea como un generador en paralelo. Luego, al apagar o desconectar el motor primario, harán de la maquina sincrónica, un motor.
3. Usar embobinados amortiguadores, estos son barras especiales colocadas en ranuras talladas sobre la cara del rotor y puestas en corto en cada extremo, por un anillo metálico, de esta manera se induce una corriente en estas barras, esta corriente genera un campo magnético que actúa con el campo magnético del estator, creando así un par de torsión que se usa para el arranque del motor.

3.3 Máquina asíncrona

3.3.1 Motor asíncrono o de inducción

Un motor de inducción tiene físicamente el mismo estator que una máquina sincrónica, con diferente construcción de rotor, hay dos tipos diferentes de rotores de motor de inducción, que se pueden colocar dentro del estator. A uno se le llama rotor de jaula de ardilla o simplemente rotor de jaula, mientras que el otro se llama rotor devanado.

Figura 30. Rotor jaula de ardilla



Fuente: Conversión de Energía Electromagnética. Vembu Gourishankar

El rotor de jaula de ardilla, consiste en una serie de barras conductoras, colocadas en ranuras talladas en la cara del rotor y con sus extremos puestos en corto, por medio de anillos de cortocircuito. Este diseño hace referencia a un rotor de jaula de ardilla, porque los conductores, si se examinan de por sí, parecen las ruedas ejercicio en donde suelen jugar las ardillas o los ratones de laboratorio.

El otro tipo de rotor es el denominado rotor devanado, el rotor devanado, tiene un juego completo de embobinados trifásicos que son la imagen reflejada de los embobinados del estator, las tres fases de los embobinados del rotor, están conectados generalmente en estrella y los extremos de los tres conductores del rotor están conectados a los anillos de rozamiento sobre el eje del rotor. Los embobinados del rotor están colocados en cortocircuito por medio de escobillas montadas sobre los anillos de rozamiento. Los rotores devanados de los motores de inducción, tienen, por lo tanto, sus corrientes del rotor con acceso por las escobillas del estator, donde pueden examinarse y donde se puede insertar una resistencia extra en el circuito del rotor.

El funcionamiento del motor de inducción es básicamente el mismo de los embobinados amortiguadores en los motores sincrónicos. Un sistema de voltajes trifásicos se ha aplicado al estator y un conjunto de corrientes trifásicas del estator circula en sus embobinados, estas corrientes producen un campo magnético, el cual gira a la velocidad de sincronismo, este campo induce voltajes y corrientes en el rotor, que a su vez genera un campo magnético, que al interactuar con el campo de estator crea un par o momento de torsión.

3.3.2 Deslizamiento

Un motor de inducción funciona normalmente a una velocidad cercana a la velocidad sincrónica, pero nunca puede funcionar exactamente a esta velocidad, ya que siempre debe haber un movimiento relativo para poder inducir un voltaje en el rotor, el término deslizamiento se refiere a esta diferencia relativa que existe entre la velocidad sincrónica y la velocidad mecánica del rotor, este deslizamiento está expresado en porcentaje y se define por:

$$s = \frac{n_{\text{sinc}} - n_m}{n_{\text{sinc}}} (\times 100\%)$$

Ec. 25

Donde:

S= deslizamiento

Nsinc= Velocidad de sincronismo

Nm= Velocidad mecánica del rotor

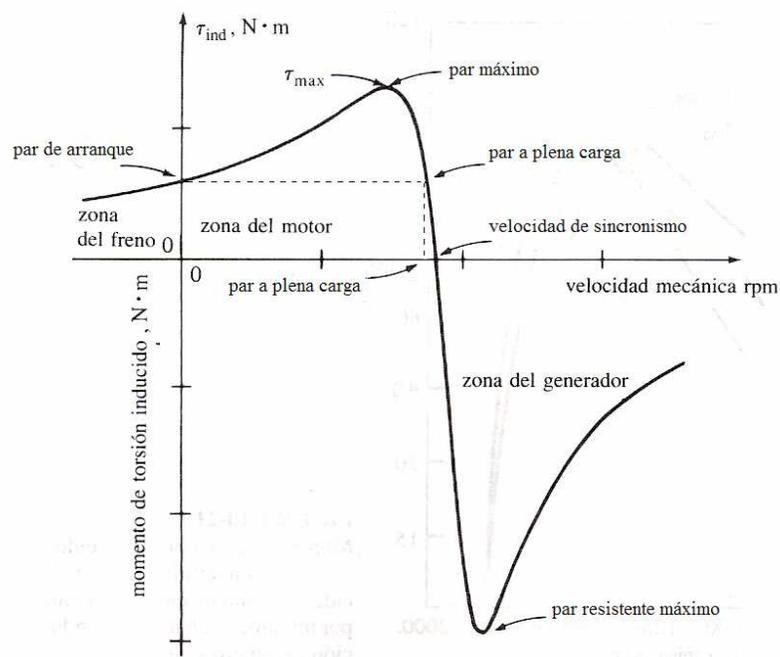
3.3.3 Característica par-velocidad

Las características de par-velocidad de un motor de inducción se pueden apreciar en la curva par-velocidad, esta curva proporciona información variada sobre el funcionamiento de los motores de inducción, esta información se resume en:

1. El par inducido del motor es cero a la velocidad de sincronismo, en este punto el deslizamiento es cero, y como no existe una diferencia relativa entre la velocidad del campo magnético y la velocidad mecánica, no se induce un voltaje en el rotor.

2. La curva par-velocidad es casi lineal entre vacío y plena carga. Entre estos límites, la resistencia del rotor es mucho mayor que su reactancia, por lo cual, su corriente, campo magnético y par inducido, aumentan linealmente al aumentar el deslizamiento.
3. Hay un par máximo que no puede sobrepasarse, este par es de dos a tres veces el par nominal a plena carga.
4. El par de arranque es ligeramente mayor que el par nominal a plena carga, por lo cual este arrancará soportando cualquier carga se le ponga a plena carga.
5. El par en el motor, para un cierto deslizamiento, varía en proporción al cuadrado del voltaje aplicado, esto es útil para el control de la velocidad del motor, por medio del voltaje aplicado.

Figura 31. Curva par-velocidad de un motor de inducción



Fuente: Conversión De Energía Electromagnética. Vembu Gourishankar

3.3.4 Generador de inducción

Si un motor primario externo maneja un motor de inducción a una velocidad mayor que la velocidad de sincronismo, se invertirá el sentido del par inducido y actuara como generador, y mientras aumente el par que el motor primario aplica sobre el eje, la cantidad de potencia que produce el generador de inducción también aumenta.

Tal como se muestra en la figura par-velocidad, hay un par inducido máximo posible, cuando funciona como generador, este se conoce como par resistente máximo, si se aplica un para máximo, el generador girará a velocidad excesiva y se dañará.

Como el generador de inducción carece de un circuito de campo separado, este generador no puede producir potencia reactiva, si no que la absorbe, por lo que siempre debe estar conectado a una fuente externa de potencia reactiva, para mantener el campo magnético de su estator.

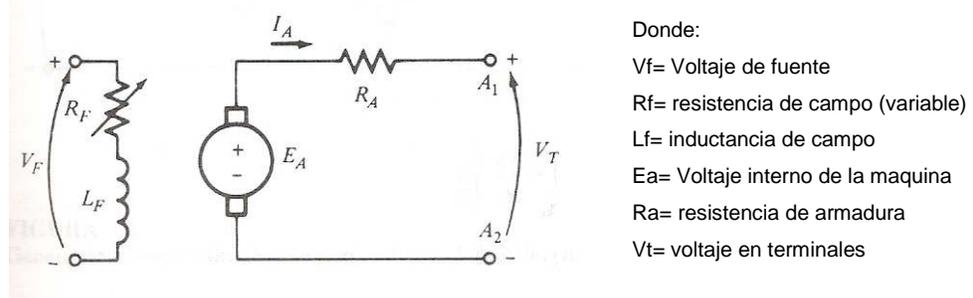
4. MÁQUINAS ROTATIVAS DE CC

4.1 Generadores de CC

Estas máquinas convierten energía mecánica en energía eléctrica el funcionamiento es el siguiente: la armadura gira entre dos polos de campo fijos, la corriente en la armadura se mueve en una dirección durante la mitad de cada revolución y en la otra dirección durante la otra mitad. Para producir un flujo constante de corriente en una dirección, o continua, es necesario disponer de un medio para invertir el flujo de corriente fuera del generador una vez durante cada revolución.

Esta inversión se lleva a cabo mediante un conmutador, que no es más que un anillo de metal partido, montado sobre el eje de una armadura. Las dos mitades del anillo se aislaban entre sí y sirven como bornes de la bobina. Las escobillas fijas de metal o de carbón se mantienen contra el conmutador, que al girar conecta eléctricamente la bobina a los cables externos, estas escobillas estaban en contacto de forma alternativa con las mitades del conmutador, cambiando la posición en el momento en el que la corriente invertía su dirección dentro de la bobina de la armadura. Así se producía un flujo de corriente de una dirección en el circuito exterior al que el generador estaba conectado. En algunas máquinas esta inversión se realiza usando aparatos de potencia electrónica, como por ejemplo rectificadores de diodo.

Figura 32. Circuito equivalente de un generador de CC



Fuente: Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctricas

Los generadores de corriente continua funcionan normalmente a voltajes bastante bajos para evitar que las chispas que se producen entre las escobillas y el conmutador a altos voltajes.

Todo generador debe ser accionado por una fuente de potencia mecánica generalmente conocida como primomotor o máquina motriz del generador. La máquina motriz de un generador de cc puede ser una turbina de vapor, un motor diesel o aun motor eléctrico.

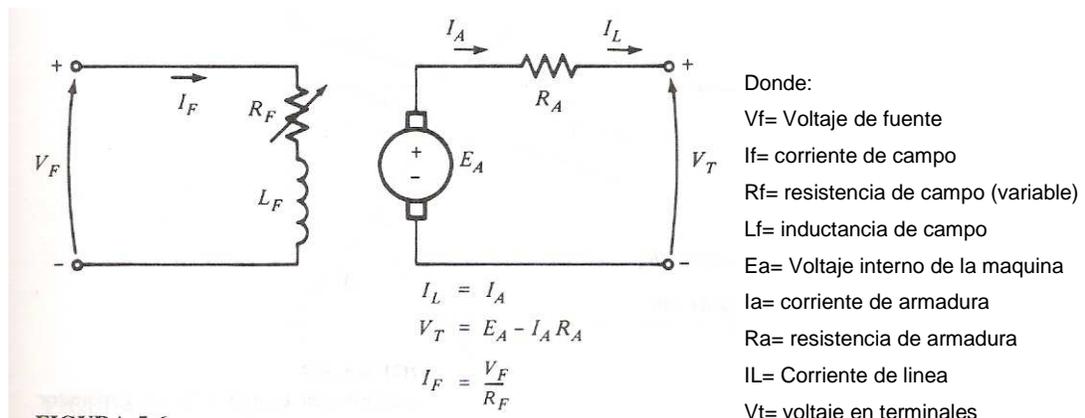
Los generadores de corriente continua se clasifican según el método que usan para proporcionar corriente de campo que excite los imanes del mismo, y se clasifican de la siguiente manera:

- Generador con Excitación Independiente
- Generador con Excitación en Derivación
- Generador con Excitación en Serie
- Generador con Excitación Compuesta Acumulativa
- Generador con Excitación Compuesta Diferencial

4.1.1 Generador con excitación independiente

El generador de cc de excitación independiente es un generador cuya corriente de campo es suministrada por una fuente separada de voltaje, en este generador las corrientes de línea y de armadura son iguales, como la fuerza electromotriz generada internamente es independiente, las características del generador de excitación independiente serán lineales.

Figura 33. Circuito equivalente generador con excitación independiente



Fuente: Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctricas

Es importante tener presente que si no existe devanado de compensación en estos generadores la reacción de armadura puede modificar las características lineales.

4.1.1.1 Control del voltaje del generador de excitación independiente

Hay dos formas de controlar la tensión de un generador de excitación independiente:

1. Variar la velocidad del eje del generador.
2. Variar la corriente de excitación del generador mediante la variación de la resistencia del campo.

El método más utilizado es el de variar las resistencias del campo, entonces, aumenta la corriente de campo, aumentando así el flujo y la tensión generada, con lo cual se incrementa también el voltaje en terminales del generador, estos métodos también se aplican al generador con excitación en derivación, y el generador con excitación compuesta acumulativa, para variar el voltaje en terminales de estos

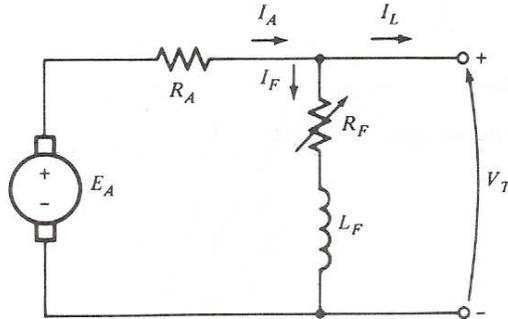
4.1.2 Generador con excitación en derivación

Un generador con excitación en derivación, tiene su campo conectado en paralelo a la armadura, el generador derivación de cc es un generador que suministra su propia corriente de excitación mediante la conexión directa del campo sobre los terminales de la maquina.

El generador derivación tiene la ventaja de que no requiere fuente adicional para alimentar su excitación, si el generador suministra su propia corriente de campo. La pregunta es: ¿Cómo consigue el flujo inicialmente el generador cuando se pone en funcionamiento?

Esto se da mediante el proceso de autoexcitación, que dice, que un generador de cc necesita de la existencia de un flujo residual en los polos de la máquina, de esta forma, cuando el generador comienza a girar se induce en la armadura un voltaje, esta tensión que puede ser de tan sólo uno o dos voltios, aparece en los terminales del generador y por consiguiente, hace circular corriente por las bobinas del campo, la corriente da lugar a una fuerza magnetomotriz que incrementa el flujo de los polos, y únicamente el efecto de la saturación magnética de los polos es el que eventualmente limita el voltaje terminal del generador.

Figura 34. Circuito equivalente generador con excitación en derivación



$$I_A = I_F + I_L$$

$$V_T = E_A - I_A R_A$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F}$$

F
C

Donde:

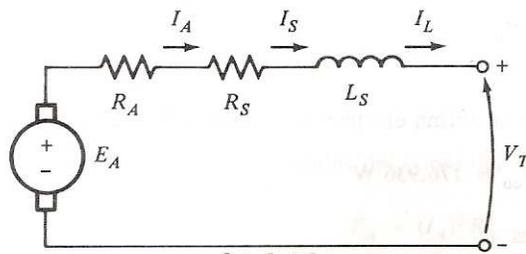
- If= corriente de campo
- Rf= resistencia de campo (variable)
- Lf= inductancia de campo
- Ea= Voltaje interno de la maquina
- Ia= corriente de armadura
- Ra= resistencia de armadura
- IL= Corriente de línea
- Vt= voltaje en terminales

Fuente: Stephen J. Chapman, Maquinas Eléctricas

4.1.3 Generador con excitación en serie

Un generador de excitación en serie tiene su campo en serie con la armadura, dado que la armadura conduce una corriente mucho más elevada que la de un campo en derivación, el campo del generador serie necesita pocas espiras de alambre cuya sección debe ser muy superior a la de un alambre de campo en derivación, ya que puede conseguirse exactamente la misma fuerza magnetomotriz mediante pocas espiras y alta corriente, que con muchas espiras y poca corriente.

Figura 35. Circuito equivalente de un generador con excitación serie



$$I_A = I_S = I_L$$

$$V_T = E_A - I_A (R_A + R_S)$$

Donde:

- I_s= corriente del inducido
- R_s= resistencia del inducido
- L_s= reactancia del inducido
- E_a= Voltaje interno de la maquina
- I_a= corriente de armadura
- R_a= resistencia de armadura
- I_L= Corriente de línea
- V_t= voltaje en terminales

Fuente: Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctricas

En este generador cuando la carga aumenta, también lo hace la corriente de campo, de tal manera que el voltaje en terminales aumenta rápidamente, después de que la máquina se aproxima a la saturación, el voltaje en terminales permanece casi invariable, este tipo de característica, de la cual es obvio que la máquina sería pésima como fuente de voltaje constante, de hecho tiene regulación de voltaje elevada y negativa.

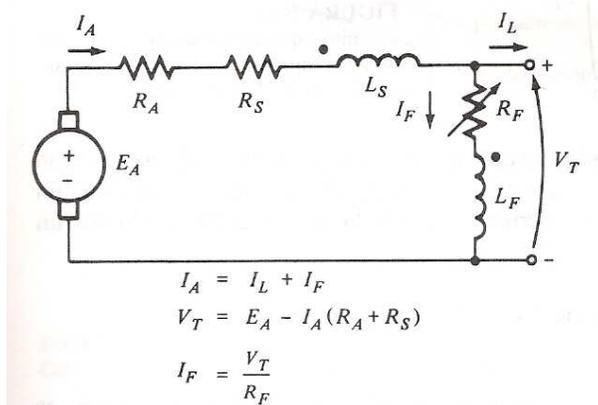
El generador serie se usa sobre todo para suministrar una corriente constante a voltaje variable, solamente se utiliza en algunos pocos casos especiales en los que pueda explotarse lo pronunciado de su característica de voltaje. Una de tales aplicaciones se presenta en la soldadura del arco, ya que cuando los electrodos se juntan antes de comenzar a soldar, circula una gran corriente, y cuando el operario separa los electrodos, rápidamente aumenta el voltaje del generador mientras se mantiene el alto valor de corriente, el voltaje sostiene el arco entre los electrodos permitiendo el proceso de soldado.

4.1.4 Generador con excitación compuesta acumulativa

Un generador de excitación compuesta o combinada, tiene parte de sus campos conectados en serie y parte en paralelo, el generador con excitación compuesta acumulativa, esta provisto de campos serie y derivación, conectados de tal manera que sus fuerzas magnetomotrices se refuerzan.

Los puntos que aparecen en el circuito equivalente del generador compuesto acumulativo, sobre las dos bobinas de campo tienen el mismo significado que en el transformador, las corrientes que penetran por un punto producen fuerza magnetomotriz positiva, aquí se muestra la conexión en "derivación larga" de este generador.

Figura 36. Circuito equivalente del generador compuesto acumulativo en su forma de derivación larga

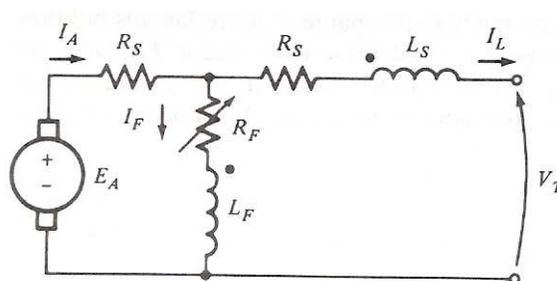


- Donde:
- RS= resistencia del inducido
 - LS= reactancia del inducido
 - IF= corriente de campo
 - RF= resistencia de campo (variable)
 - LF= reactancia de campo
 - Ea= Voltaje interno de la maquina
 - IA= corriente de armadura
 - RA= resistencia de armadura
 - IL= Corriente de línea
 - Vt= voltaje en terminales

Fuente: Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctricas

La corriente del inducido penetra por el extremo punteado de la bobina serie, y la corriente, también entra por el extremo punteado de la bobina del campo en derivación. Otra forma de conectar el generador con excitación acumulativa es la conexión, en "derivación corta", en la cual el campo serie queda por fuera del circuito del campo en derivación.

Figura 37. Circuito equivalente del generador compuesto acumulativo en su forma de derivación corta



- Donde:
- RS= resistencia del inducido
 - LS= reactancia del inducido
 - IF= corriente de campo
 - RF= resistencia de campo (variable)
 - LF= reactancia de campo
 - Ea= Voltaje interno de la maquina
 - IA= corriente de armadura
 - IL= Corriente de línea
 - Vt= voltaje en terminales

Fuente: Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctricas

Cuando se aumenta la carga del generador, ocurren dos fenómenos en el generador:

1. Cuando la corriente aumenta, también lo hace la caída de tensión lo cual tiende a disminuir el voltaje terminal.
2. Cuando la corriente aumenta, la fuerza magnetomotriz del devanado serie también aumenta. y por lo tanto el flujo, el incremento del flujo aumenta el voltaje interno, lo cual, a su vez, tiende a hacer subir el voltaje terminal.

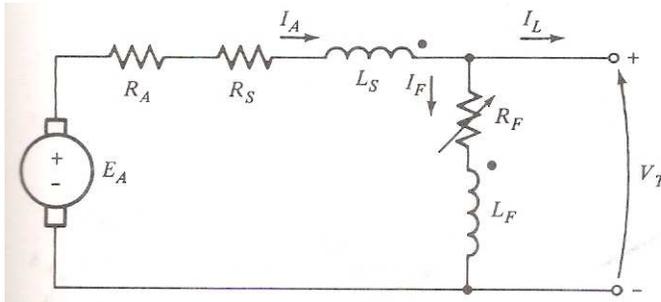
Estos dos efectos son opuestos entre sí; uno tiende a elevar el voltaje en terminales y el otro tiende a disminuirlo. ¿Cual de los dos predomina en una máquina dada? Todo depende del número de espiras del arrollamiento serie de la máquina

Los métodos más utilizados para regular el voltaje terminal del generador con excitación compuesta acumulativa son exactamente los mismos que se emplearon en el generador con excitación independiente y en derivación.

4.1.5 Generador con excitación compuesta diferencial

El generador de cc con excitación compuesta diferencial es un generador dotado de campo en derivación y en serie, pero de manera que sus fuerzas magnetomotrices sean opuestas entre si, de igual manera que el generador con excitación compuesta acumulativa, el generador con excitación compuesta diferencial puede conectarse en derivación larga o en derivación corta.

Figura 38. Circuito equivalente de un generador con excitación compuesta diferencial en derivación larga



Donde:

R_S = resistencia del inducido

L_S = reactancia del inducido

I_f = corriente de campo

R_f = resistencia de campo (variable)

L_f = reactancia de campo

E_a = Voltaje interno de la maquina

I_a = corriente de armadura

R_a = resistencia de armadura

I_L = Corriente de línea

V_t = voltaje en terminales

$$I_A = I_L + I_F$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F}$$

$$V_T = E_A - I_A(R_A + R_S)$$

Fuente: Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctricas

En el generador con excitación compuesta diferencial se presentan los mismos dos efectos que se manifiesta en el generador con excitación compuesta acumulativa, pero en este caso ambos efectos son de igual sentido, Como ambos efectos tienden a disminuir el voltaje en terminales, la tensión cae drásticamente cuando se incrementa la carga del generador.

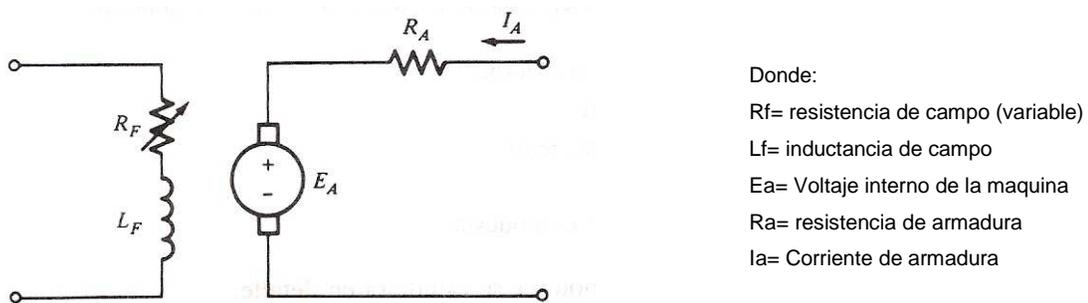
Aun a pesar de que pueda pensarse que la característica descendente del voltaje del generador con excitación compuesta diferencial es mala, también es posible regular el voltaje terminal a cualquier carga, empleando las mismas técnicas utilizadas en los generadores derivación, independiente y de excitación compuesta acumulativa, que son:

1. Variar la velocidad de rotación.
2. Variar la corriente de campo.

4.2 Motores de CC

En general, los motores de corriente continua son similares en su construcción a los generadores de cc, físicamente es la misma máquina que un generador de cc, excepto por la dirección de circulación de la corriente. De hecho podrían describirse como generadores que funcionan al revés, cuando la corriente pasa a través de la armadura de un motor de corriente continua, se genera un par de fuerzas por la reacción magnética, y así la armadura gira, la acción del conmutador y de las conexiones de las bobinas del campo de los motores son las mismas que usan los generadores.

Figura 39. Circuito equivalente de un motor de CC



Fuente: Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctricas

El funcionamiento en estos motores es el siguiente: el movimiento de la armadura induce un voltaje en las bobinas de ésta, este voltaje es opuesto en dirección al voltaje exterior que se aplica a la armadura, y de ahí que este se conozca como voltaje inducido o fuerza contraelectromotriz.

Cuando el motor gira más rápido, el voltaje inducido aumenta hasta que es casi igual al aplicado, entonces la corriente es pequeña, y la velocidad del motor permanecerá constante siempre que el motor no esté bajo carga y tenga que realizar otro trabajo mecánico que no sea el requerido para mover la armadura.

Bajo carga, la armadura gira más lentamente, reduciendo el voltaje inducido y permitiendo que fluya una mayor corriente en la armadura, el motor puede así recibir más potencia eléctrica de la fuente, suministrándola y haciendo más trabajo mecánico.

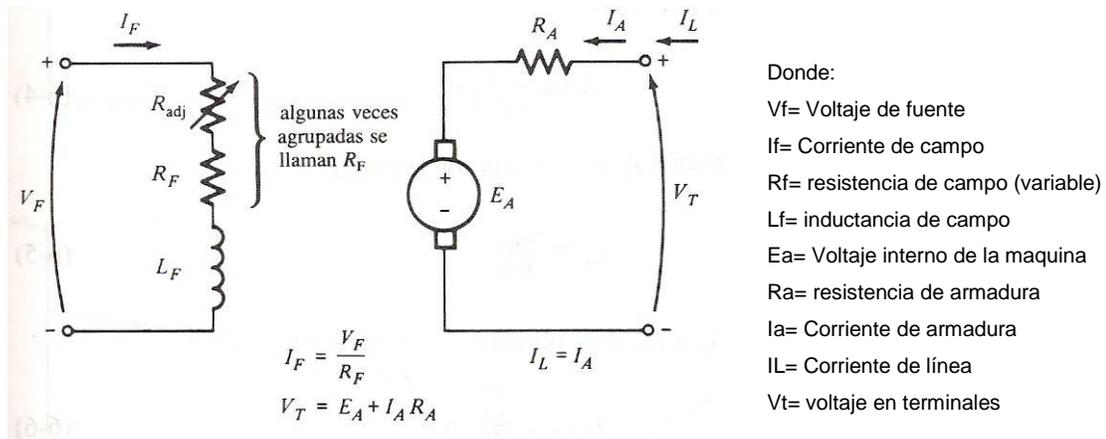
Debido a que la velocidad de rotación controla el flujo de la corriente en la armadura, cuando la armadura está parada, ésta no tiene realmente resistencia, y si se aplica el voltaje de funcionamiento normal, se producirá una gran corriente, que podría dañar el conmutador y las bobinas de la armadura, el medio normal de prevenir estos daños es el uso de una resistencia de encendido conectada en serie a la armadura, para disminuir la corriente antes de que el motor consiga desarrollar el voltaje inducido adecuado, cuando el motor acelera, la resistencia se reduce gradualmente, tanto de forma manual como automática.

La velocidad de los motores de corriente continua puede controlarse mediante la variación de la corriente del campo.

4.2.1 Motor con excitación independiente

Un motor con excitación externa es aquel cuyo circuito de campo lo abastece una fuente de alimentación de voltaje externo, las características de este motor se pueden cambiar alterando la fuerza del campo magnético fijo que produce el electroimán del estator. Esto se puede llevar a cabo variando la corriente que circula en el electroimán del estator o corriente de campo, para variar esta corriente de campo, se puede emplear un reóstato conectado en serie con la bobina del electroimán, el electroimán del estator, o electroimán de campo, consiste en un devanado en derivación conectado directamente a la fuente c.c. de voltaje.

Figura 40. Circuito equivalente de un motor con excitación independiente



Fuente: Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctricas

En este motor, la velocidad resulta afectada, en función del voltaje de armadura, y el par en función de la corriente de armadura, aumentando la corriente de campo de un motor con excitación independiente durante el arranque, se mejora el par del motor, y así, este se acelera más rápidamente.

Además durante un corto período, es posible aumentar la corriente de campo de un motor con excitación independiente por encima de su valor nominal, como resultado, el motor puede desarrollar un par elevado durante este periodo pero se reduce la velocidad con que puede girar sin exceder su voltaje nominal de armadura.

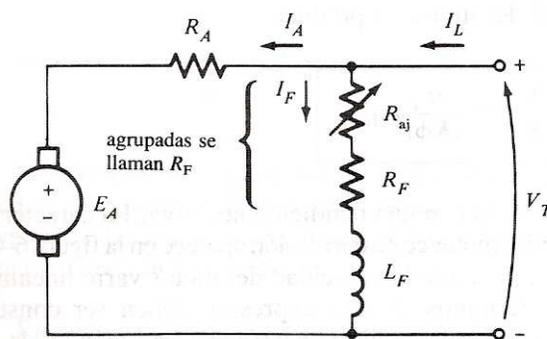
4.2.2 Motor con excitación en derivación

El motor derivación tiene las bobinas inductoras compuestas por muchas espiras de hilo fino, conectadas en paralelo con el arrollamiento del inducido o armadura. Este motor posee un par de arranque mediano y una característica de velocidad dura, es decir que la velocidad es prácticamente independiente de las variaciones de la carga.

Los motores derivación de cierta potencia suelen estar provistos de un pequeño arrollamiento adicional en serie con el inducido, llamado devanado de compensación, el cual tiene por objeto evitar el embalamiento eventual del motor o bien conseguir una ligera reducción de la velocidad cuando la carga aumenta.

Este tipo de motor posee la misma configuración que un generador con excitación en derivación, y responde a la carga de la siguiente forma; si se incrementa la carga en el eje del motor, el par de carga ira aumentando, cuando el par de carga exceda el par producido en la máquina, el motor comenzará a ir más despacio, cuando va más lento, el voltaje generado cae, así que la corriente de armadura en el motor se incrementa, este incremento de corriente de armadura, incrementa el par producido en el motor y finalmente el par producido será igual al par de la carga a una menor velocidad mecánica de rotación. Es importante aclarar que la velocidad del motor varía linealmente con el par, asumiendo que el voltaje en terminales suministrado por la fuente de cc, es constante, si no es constante, entonces la relación par-velocidad del motor variara.

Figura 41. Circuito equivalente de un motor con excitación en derivación



Donde:

- If= Corriente de campo
- Rf= resistencia de campo (variable)
- Lf= inductancia de campo
- Ea= Voltaje interno de la maquina
- Ra= resistencia de armadura
- la= Corriente de armadura
- IL= Corriente de línea
- Vt= voltaje en terminales

$$I_F = \frac{V_T}{R_F}$$

$$V_T = E_A + I_A R_A$$

$$I_L = I_A + I_F$$

Fuente: Stephen J. Chapman, Maquinas Eléctricas

Si un motor tiene devanados de compensación no habrá problemas por el efecto desmagnetizante en la máquina y su flujo permanecerá constante. Las características de un motor shunt o derivación se pueden cambiar variando la corriente de campo por medio de un reóstato.

La ventaja principal de un motor derivación es que requiere una única fuente c.c. de voltaje fijo para alimentar la armadura y el devanado en derivación. Además, la velocidad cambia muy poco cuando la carga mecánica varia. No obstante, un motor derivación tiene un rango de velocidades limitado porque no es fácil variar la velocidad cambiando el voltaje de armadura. Asimismo, se debe limitar la corriente de armadura durante el arranque del motor (cuando se lo energiza) para evitar dañarlo.

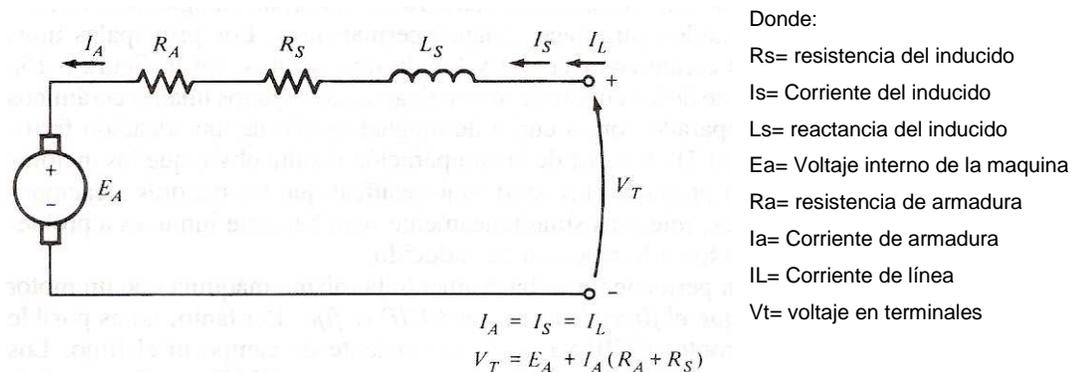
4.2.3 Motor con excitación en serie

El motor serie tiene las bobinas inductoras formadas por unas pocas espiras de hilo grueso, conectadas en serie con el arrollamiento del inducido. Este motor posee un par de arranque elevado y una característica de velocidad suave (todo aumento de carga provoca una disminución de la velocidad, y viceversa), además de poseer un amplio rango de velocidades de funcionamiento

Sin embargo, la velocidad, el par y la corriente de armadura dependen de la carga mecánica aplicada al motor, además los motores serie también tienen una característica de funcionamiento no lineal, Como consecuencia, resulta difícil hacer funcionar un motor serie con velocidad constante cuando la carga mecánica fluctúa.

Asimismo, se debe limitar la corriente de armadura durante el arranque del motor (cuando lo energiza) para evitar dañarlo. Finalmente, un motor serie nunca debe funcionar sin carga mecánica porque su velocidad puede aumentar hasta alcanzar valores muy elevados (motor embalado) que pueden dañar al motor.

Figura 42. Circuito equivalente de un motor con excitación serie



Fuente: Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctricas

Un motor serie da más par por amperio que cualquier otro motor de cc. Por esto se utiliza en aplicaciones que se requieren pares muy altos, esto es debido al hecho de que el flujo es directamente proporcional a la corriente de armadura, al menos hasta alcanzar la saturación.

4.2.3.1 Control de velocidad de un motor serie

A diferencia del motor en derivación de cc, solamente hay una forma eficiente para cambiar la velocidad de un motor serie de cc. Este método es cambiar el voltaje terminal del motor, si el voltaje en terminales se incrementa, resultara una velocidad más alta para cualquier par dado.

La velocidad de un motor serie de cc también puede controlarse mediante la inserción de una resistencia en serie con el circuito del motor, pero esta técnica es muy antieconómica en potencia y solamente se usa para períodos intermitentes durante el arranque algunos motores, esto se ha modificado hoy en día gracias a la introducción de circuitos electrónicos de control basados en transistores.

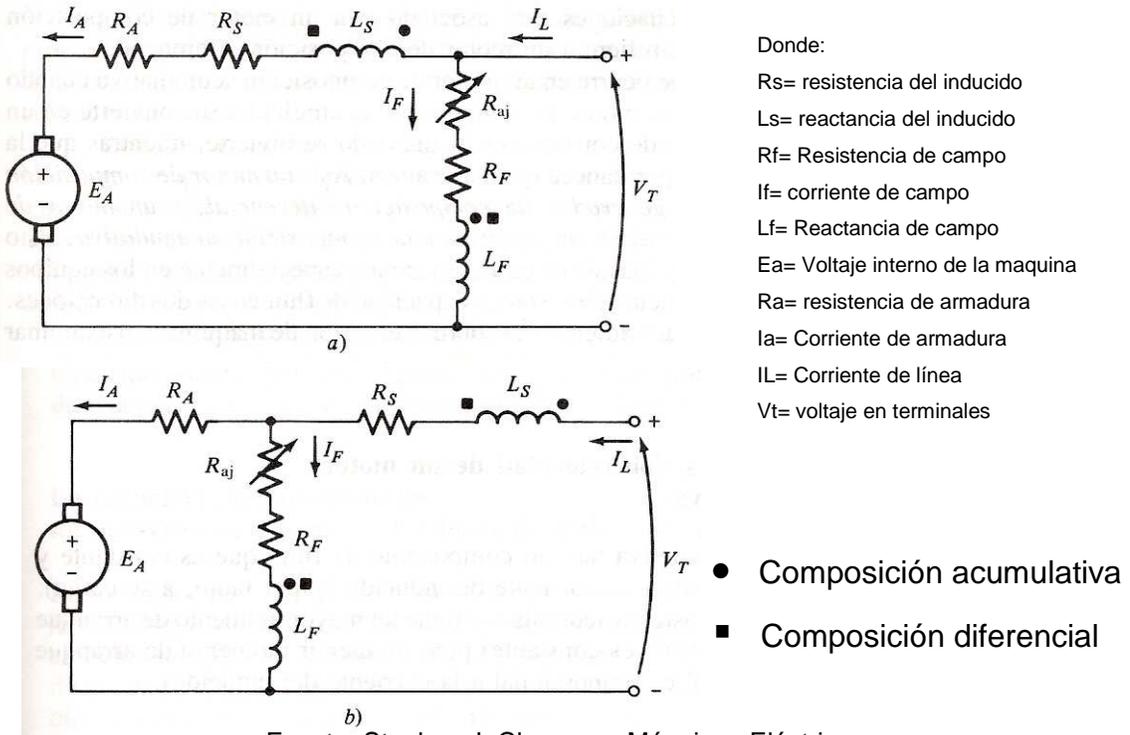
4.2.4 Motor con excitación compuesta o compound

En el motor compuesto o compound, cada bobina inductora está formada por dos arrollamientos independientes, uno de los cuales va conectado en serie con el inducido, y el otro en paralelo con el inducido y el arrollamiento serie. De este modo el campo inductor resultante es una combinación de los campos creados por cada arrollamiento inductor parcial, y el motor compound reúne las características de los motores serie y derivación.

Es posible combinar los devanados en serie y en derivación para obtener una característica particular de la velocidad decreciente cuando el par del motor aumenta. Este tipo de motor c.c. se llama motor compound acumulativo porque los flujos magnéticos producidos por los devanados en serie y en derivación se suman entre sí.

Los devanados paralelo y serie también se pueden conectar para que los flujos magnéticos se resten uno del otro. Con esta conexión se obtiene el motor compound diferencial, que se usa raramente porque el motor se vuelve muy inestable cuando la corriente de armadura aumenta. Al igual que en los generadores de c.c. el motor compuesto, se puede representar en su forma derivación larga o corta.

Figura 43. a) Circuito equivalente de motor compound en derivación larga
b) Circuito equivalente de motor compound en derivación corta



Fuente: Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctricas

Nuevamente se utiliza la convención al punto, corresponde a una fuerza magnetomotriz positiva, en donde el signo, positivo asociado con un motor de excitación compuesta acumulativa, y el signo negativo asociado con un motor de excitación compuesta diferencial.

Es importante observar que ocurre con un motor de excitación compuesta cuando la potencia fluye al revés. Entonces, un motor de excitación compuesta acumulativa llegara a ser un generador de excitación compuesta diferencial, y un motor de excitación compuesta diferencial llegará a ser un generador de excitación compuesta acumulativa. Esto influencia a menudo la escogencia de máquinas de cc en sistemas, especialmente en conjuntos de motor–generador en donde la potencia puede fluir en ambas direcciones.

4.2.5 Motor de CC de imán permanente

Un motor de cc de imán permanente es un motor cuyos polos son hechos de imanes permanentes. En esencia, es un motor en derivación en el cual su circuito de campo se reemplaza por imanes permanentes. Estos motores algunas veces se emplean para manejar pequeñas cargas en lugar de motores en derivación, puesto que son menos complicados. En un motor de imán permanente el flujo constante, así que su velocidad no puede controlarse mediante la variación de la corriente o flujo de campo.

4.2.6 Motor universal

Se llama motor universal al que puede funcionar indistintamente con corriente continua y con corriente alterna monofásica sin que su velocidad sufra variación sensible, se trata de motores serie, con elevado par de arranque y características de velocidad variable.

Este motor está construido de manera que cuando los devanados inducidos e inductor están unidos en serie y circula corriente por ellos, se forman dos flujos magnéticos que al reaccionar provocan el giro del rotor, tanto si la tensión aplicada es continua como alterna.

CONCLUSIONES

1. Que la educación a distancia para el aprendizaje en línea, constituye, una corriente innovadora de la educación contemporánea, por que rompe la estructura de la escuela institucionalizada al trascender el acto educativo hasta el lugar en el que se ubica el educando.
2. El aprendizaje en línea reduce notablemente los costos de la formación y enseñanza, edemas, no requiere de un espacio físico ni el desplazamiento del estudiante.
3. El aprendizaje en línea amplía notablemente su alcance, dando mayores posibilidades a los estudiantes que se encuentran más alejados de los centros de formación, además de permitir el acceso de estos, a los cursos con total libertad de horarios.
4. Este tipo de enseñanza distribuye la información de forma rápida y precisa a todos los participantes, además, prepara al educando para competir en el mercado de manera más ágil, rápida y eficiente.
5. Que la educación a distancia para el aprendizaje en línea, convierte la docencia virtual en una opción real y aplicable.

RECOMENDACIONES

1. Que la USAC realice un estudio de factibilidad sobre otras modalidades de atención educativa, entre ellas la educación a distancia, que favorecen el acceso a la educación superior de aquella población que no ha podido ingresar o que ha desertado de ella por diversas razones.
2. Que la Facultad de Ingeniería motive y apoye tanto a los estudiantes, como a los catedráticos de esta facultad, para que estos participen en este tipo de enseñanza, aprovechando de esta manera los recursos disponibles.
3. Que se impartan cursos a los catedráticos o encargados de los cursos a distancia para el aprendizaje en línea, para que estos sepan manejar de manera eficiente las herramientas que este tipo de enseñanza proporciona.
4. Que se promueva e informe a toda la comunidad de la Facultad de Ingeniería sobre este método de enseñanza, así como sus beneficios, para que de esta manera

BIBLIOGRAFÍA

1. Boylestad Robert L. **Análisis introductorio de circuitos**. 5ta. Edición. Editorial Trillas, 1993
2. Escolet, Miguel A. **Tendencia de la educación superior a distancia**. 2da. Edición, UNED, San José de Costa Rica, 2001.
3. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr. Stephen D. Umans. **Máquinas Eléctricas**. 5ta. Edición, Editorial Mc. Graw Hill, 1992
4. Gourishankar, Vembu. **Conversión de energía electromagnética**. Mexico: Editorial Alfaomega, 1990
5. Hummel, Charles. **La educación hoy frente al mundo de mañana**. Editorial Voluntad, UNESCO, Colombia 2003
6. Kosow, Irving L. **Máquinas eléctricas y transformadores**. 2da. Edición. México: Prentice-Hall, 1993.
7. Liwshitz-Garik, Michael **Máquinas eléctricas de corriente alterna**. 1ra. Edición. s. e. México, 1970.
8. McPherson, George; tr. Carlos Alvarez Silva. **Introducción a máquinas eléctricas y transformadores**. México: Limusa, 1987.
9. Muller, Wolfgang. **Electrotecnia de potencia**. Editorial Reverte. España: Barcelona, 1987.
10. Staff del M.I.T. **Circuitos magnéticos y transformadores**. s.e. Editorial Reverté S.A., 1981
11. Stephen J. Chapman, **Máquinas eléctricas**, 2da. Edición, Editorial Mc. Graw-Hill, 1993