

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO**



**ESTUDIO DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS PARA EL  
INGENIERO EN ELECTRONICA**

**POR**

**ING. JESUS GUADALUPE CASTAÑEDA MARROQUIN**

**T E S I S**

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA  
CON ESPECIALIDAD EN ELECTRONICA**

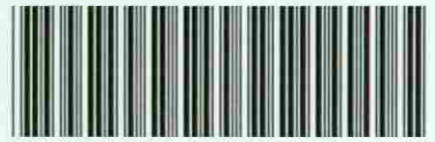
**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. DICIEMBRE DE 1998**

C. C. TK 145  
1737

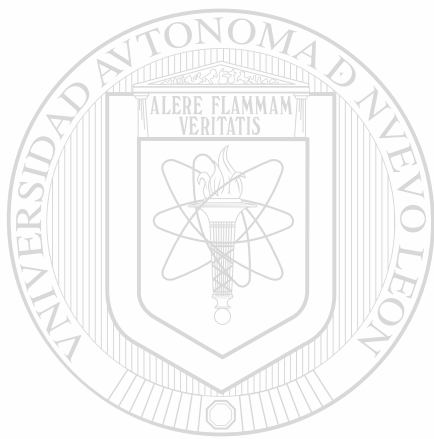
ESTUDIO DE LAS MAQUINAS ELÉCTRICAS PARA EL

INGENIERO EN ELÉCTRICA

J. G. C. M.



1080087055



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



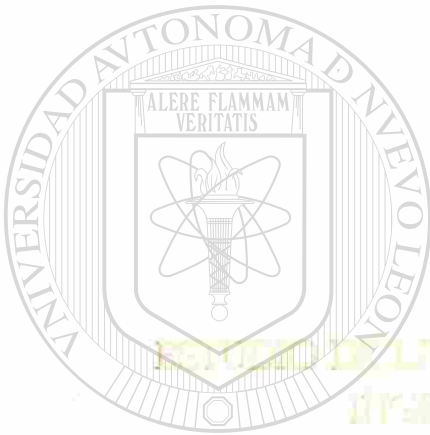
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

9527

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST GRADO



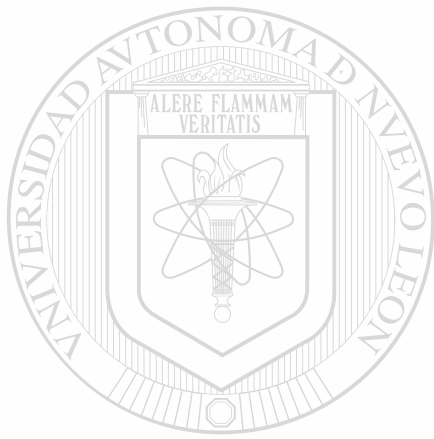
UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TESIS

EN OPORTUNIDAD AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA EN MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN...

T.M.  
X / S  
C 37



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO**



**ESTUDIO DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS PARA EL  
INGENIERO EN ELECTRONICA**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**POR**  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**ING. JESUS GUADALUPE CASTAÑEDA MARROQUIN**

**T E S I S**

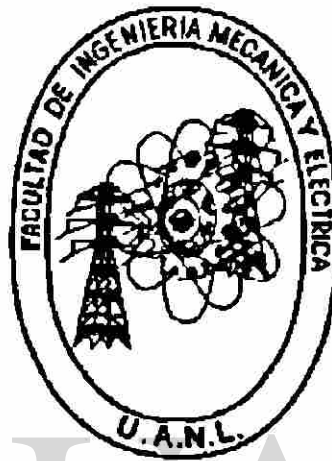
**En opción al Grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica  
Con especialidad en Electrónica**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L. DICIEMBRE DE 1998**

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**ESTUDIO DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS PARA EL  
INGENIERO EN ELECTRONICA**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

POR  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ING. JESUS GUADALUPE CASTAÑEDA MARROQUIN

**T E S I S**

En opción al Grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica  
Con especialidad en Electrónica

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L. DICIEMBRE DE 1998



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





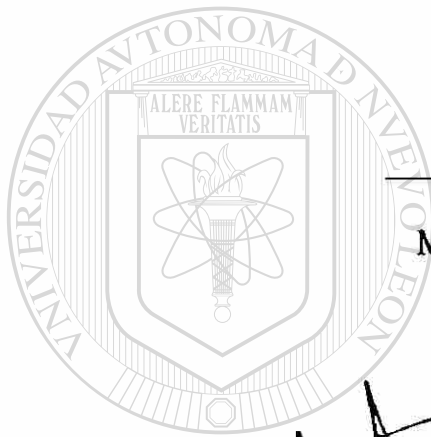
# UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERÍA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la presente tesis "Estudio de las Máquinas Eléctricas para el Ingeniero en Electrónica", realizada por el alumno Ingeniero Jesús Guadalupe Castañeda Marroquín, matrícula 404343, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con Especialidad en Electrónica.

El Comité de Tesis



M.C. Luis Manuel Camacho Velázquez  
Asesor

M.C. Paz Vicente Cantú Gutiérrez  
Coasesor

M.C. Evelio Prisciliano González Flores  
Coasesor

Vo.Bo.

M.C. Roberto Villarreal Garza  
División de Estudios de Post-grado

San Nicolás de Los Garza, N.L. a 5 de Diciembre de 1998

# PROLOGO

Decidí elaborar esta tesis por la necesidad de tener concentrada la información necesaria y suficiente para la impartición de clase de Conversión de Energía Electromecánica, que es una clase que cursan exclusivamente los alumnos de la Licenciatura de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Esta tesis es el resultado de ya casi 7 años de impartir esta clase, y la problemática a la que me he enfrentado ha sido que el alumno ve demasiada cantidad de temas en solo un semestre, y al no tener una guía de estudios específica que refuerze su conocimiento adquirido en aula, el alumno puede llegar a perderse en la búsqueda de la información.

Es difícil encontrar bibliografía que trate en un solo libro temas como circuitos magnéticos, transformadores, máquinas de corriente alterna y corriente directa, máquinas sincrónicas, motores de corriente directa de conmutación electrónica, motores de pasos y el control de velocidad para motores de corriente directa y de corriente alterna.

Los libros que tratan de estos temas por separado llegan a veces a ser difíciles para el alumno ya que tratan los temas a profundidad, incluyendo demasiadas ecuaciones matemáticas y análisis profundos de diseño y operación.

Esta tesis tiene como objetivo principal el ser la guía de estudio para el alumno que curse la materia porque contiene solo lo que el alumno necesita en cada uno de los temas, además de que se han incluido la suficiente cantidad de fotografías para que el alumno identifique rápidamente la máquina a la que se hace referencia.

Los primeros capítulos de este trabajo son los conocimientos pilares en el estudio de las máquinas eléctricas pero en los capítulos de motores de pasos, motores de conmutación electrónica y en el de control electrónico de motores se incluye la más reciente información obtenida gracias a las compañías del ramo que operan en la Ciudad de Monterrey, Nuevo León.

# CONTENIDO

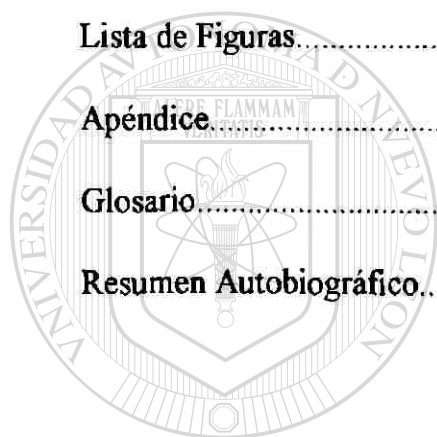
1.- Síntesis.....	10
2.- Introducción.....	13
2.1 Objetivo.....	13
2.2 Justificación.....	13
2.3 Metodología.....	13
2.4 Revisión bibliográfica.....	13
3.- Circuitos Magnéticos.....	14
3.1 Introducción.....	14
3.2 Imanes naturales y artificiales.....	14
3.3 Materiales magnéticos.....	15
3.4 Polos magnéticos.....	16
3.5 El polo magnético unitario.....	16
3.6 El Campo magnético de la Tierra.....	17
3.7 Electromagnetismo.....	17
3.8 La regla de la mano derecha en alambres con corriente eléctrica.....	17
3.9 La regla de la mano derecha para bobinas.....	18
3.10 Unidades de medición en magnetismo.....	18
3.11 El flujo magnético.....	19
3.12 Densidad de flujo.....	19
3.13 Fuerza magnetomotriz.....	20
3.14 Reluctancia.....	20
3.15 Comparación de circuitos eléctricos y magnéticos.....	21
3.16 Fuerza magnetizante.....	23
3.17 Permeabilidad magnética.....	23
3.18 Ley de Rowland.....	24
3.19 Reluctancias en serie.....	24
3.20 Reluctancias en paralelo.....	24
3.21 Curva de imanación.....	25
3.22 Cálculos con circuitos magnéticos.....	26
3.23 Electroimanes.....	27
3.24 Saturación magnética.....	28
3.25 Retentividad magnética.....	28
3.26 Coercitividad magnética.....	28
3.27 Histeresis.....	29
3.28 Corrientes parásitas.....	31
3.29 Núcleos de polvo de hierro.....	31
4.- Transformadores.....	33
4.1 Introducción.....	33
4.2 Transformadores.....	33
4.3 Condiciones generales de servicio.....	35
4.4 Clasificación.....	36

4.5	Especificaciones eléctricas .....	36
4.6	Designación de terminales.....	38
4.7	Relación de transformación.....	38
4.8	Bancos estrella-delta.....	39
4.9	Bancos delta-delta.....	39
4.10	Protección de motores.....	40
4.11	Análisis de los transformadores.....	41
4.12	Obtención de los parámetros del transformador.....	43
4.13	Transformadores trifasicos.....	44
4.14	Conexiones de transformadores para formar trifasicos.....	45
4.15	Regulación de voltaje.....	46
4.16	Corrección de resistencia por Temperatura.....	46
4.17	Fabricación de transformadores comerciales.....	47
4.18	Principales materiales y componentes de un transformador.....	50
4.19	Tipos comerciales de transformadores.....	51
4.20	Transformadores de potencia.....	53
4.21	Transformadores para control y alumbrado.....	53
4.22	programa recomendado para pruebas de mantenimiento.....	54
5.-	Motores de Inducción Monofasicos.....	58
5.1	Introducción.....	58
5.2	Principio de funcionamiento.....	58
5.3	Elementos mecánicos del motor monofasico.....	58
5.4	Partes principales del motor de inducción.....	58
5.5	El concepto de deslizamiento del rotor.....	59
5.6	Devanados de trabajo y de arranque.....	60
5.7	Arranque de los motores monofasicos de inducción.....	60
5.8	El motor de fase partida.....	60
5.9	Motores con condensadores de arranque.....	61
5.10	Motores con condensador permanente.....	63
5.11	Motores con condensador de arranque y permanente.....	63
5.12	Motores de polos sombreados.....	64
5.13	Control de velocidad en los motores monofasicos.....	65
6.-	Motores de Inducción Trifasicos.....	66
6.1	Introducción.....	66
6.2	Leyes fundamentales.....	66
6.3	Construcción del motor de inducción trifasico.....	67
6.4	El campo magnético giratorio.....	67
6.5	El concepto de deslizamiento del rotor.....	69
6.6	Frecuencia eléctrica del motor.....	70
6.7	Circuito equivalente del motor trifasico de inducción.....	71
6.8	El motor de inducción como transformador.....	71
6.9	Modelo del circuito del rotor.....	73
6.10	Circuito equivalente de parámetros.....	74
6.11	Determinación de parámetros del motor de inducción trifasico.....	75

6.12	Potencia en motores de inducción.....	75
6.13	Producción de par en motores de inducción.....	76
6.14	Terminales y devanados de los motores de inducción trifásicos.....	79
6.15	Clases de diseño de los motores de inducción.....	85
6.16	Tendencias de los motores de inducción.....	86
<b>7.- Maquinas de Corriente Continua.....</b>		<b>87</b>
7.1	Introducción.....	87
7.2	Constitución de las maquinas de corriente continua.....	87
7.3	Partes y principios de funcionamiento.....	88
7.4	Potencia y elevaciones de temperatura.....	90
7.5	Clasificación de las maquinas de corriente continua.....	91
7.6	Dinamos shunt.....	92
7.7	Dinamos serie.....	93
7.8	Dinamos compound.....	94
7.9	Funcionamiento de los motores de corriente continua.....	95
7.10	Motores shunt.....	96
7.11	Motores serie.....	97
7.12	Motores compound.....	97
7.13	Par motor.....	99
7.14	Regulación y control de velocidad.....	100
7.15	Arranque de los motores de corriente continua.....	102
7.16	Pruebas de motores al freno.....	103
7.17	Calculo de la potencia en HP.....	104
7.18	Pruebas de rendimiento.....	105
7.19	Devanados de armadura.....	105
<b>8.- Maquinas Síncronas.....</b>		<b>108</b>
8.1	Introducción.....	108
8.2	Construcción de las maquinas síncronas.....	109
8.3	Funcionamiento del generador síncronico.....	110
8.4	Funcionamiento del motor síncronico.....	111
8.5	Arranque de los motores síncronos.....	112
8.6	Arranque utilizando el devanado amortiguador.....	113
8.7	Arranque de un motor síncronico con carga.....	114
8.8	Curvas "v" de un motor síncronico.....	115
8.9	Capacidad de los motores contra especificaciones del factor de potencia.....	117
8.10	Capacitores síncronos.....	117
8.11	Ventajas de la corrección del factor de potencia.....	118
8.12	Métodos de corrección del factor de potencia.....	118
8.13	Limites económicos del mejoramiento del factor de potencia.....	119
8.14	Motores supersíncronos.....	120
8.15	Motores especiales que no emplean excitación de campo de c.c.....	120
8.16	Motores síncronos de inducción.....	120
8.17	Motor síncronico sin escobillas.....	121

9.- Motores de Corriente continua Sin Escobillas.....	122
9.1 Introducción.....	122
9.2 Ventajas de los motores de c.c. sin escobillas.....	122
9.3 Motor de conmutación electrónica.....	123
9.4 Motor de c.c. sin escobillas del tipo de inversor de cc/ca.....	125
9.5 Motor de c.c. sin escobillas de giro limitado.....	125
9.6 Aplicaciones.....	127
10. Motores de Pasos.....	130
10.1 Introducción.....	130
10.2 Partes de los motores de pasos.....	130
10.3 Como trabajan los motores de paso.....	131
10.4 Diferencias entre el motor de paso y el motor de c.c. convencional.....	132
10.5 Características mas comunes de los motores de paso.....	134
10.6 Tipos de motores de pasos.....	135
10.7 Motores de paso de reluctancia variable.....	135
10.8 Motores de paso con magneto permanente.....	136
10.8.1 Motores con magneto permanente unipolares.....	137
10.8.2 Motores con magneto permanente bipolares.....	139
10.9 Motores de paso híbridos.....	140
10.10 Circuitos transductores.....	140
11. Control Electrónico de Motores.....	144
11.1 Introducción.....	144
11.2 La regulación de velocidad.....	144
11.3 Funciones de un regulador de velocidad.....	145
11.4 Principios de la regulación de velocidad.....	145
11.4.1 Regulación en lazos convergentes.....	145
11.4.2 Regulación lineal en cascada.....	146
11.4.3 Regulación paralela.....	147
11.5 Inversor de frecuencia para corriente alterna.....	148
11.6 Definición de “Drive” de corriente alterna.....	149
11.7 El inversor tipo convencional.....	149
11.8 Inversores tipo vector.....	149
11.9 Componentes que forman a un inversor.....	150
11.10 Funcionamiento de un inversor.....	153
11.11 Aplicaciones de los inversores de frecuencia.....	155
11.12 Inversores de mercado marca “ Safronic”.....	159
11.13 Dispositivos utilizados para obtener la retroalimentacion de señal.....	160
11.14 Variadores de velocidad para corriente directa.....	163
11.15 Control de estado sólido en los variadores de velocidad de c.d.....	164
11.16 Métodos de control de velocidad.....	164
11.17 Regulación de velocidad de los motores de corriente continua.....	168
11.18 Regulación de corriente.....	169
11.19 Limitador de corriente.....	170
11.20 Drives unidireccionales no regenerativos.....	171

11.21	Drives bidireccionales regenerativos	171
11.22	Frenado dinámico.....	173
11.23	Drives de transistores.....	174
11.24	Aplicaciones de los drives a transistores.....	174
11.25	Convertidores de un solo cuadrante.....	174
11.26	Convertidores de dos cuadrantes.....	176
11.27	Convertidores de cuatro cuadrantes.....	177
11.28	Drives de c. d. utilizados en el mercado.....	178
12.	Conclusiones y Recomendaciones.....	180
	Bibliografía.....	181
	Lista de Tablas.....	184
	Lista de Figuras.....	185
	Apéndice.....	189
	Glosario.....	190
	Resumen Autobiográfico.....	193



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN<sup>®</sup>  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

# 1. SINTESIS

En este trabajo se sigue el mismo plan general, es decir cada capítulo comienza con una introducción sobre el tema y después se desarrolla el mismo.

En el capítulo 2 se describe el objetivo de la tesis, así como la justificación, metodología y la revisión bibliográfica.

En el capítulo 3 se trata el tema de los circuitos magnéticos aquí se hace referencia a las leyes fundamentales del electromagnetismo, como son la ley de Ampere, la ley de Faraday y la ley de Lenz entre otras, también se definen los términos de flujo magnético, densidad de flujo, fuerza magnetizante, permeabilidad magnética y reluctancia magnética, se hace una comparación entre los imanes naturales y los artificiales y los métodos de fabricación de los imanes artificiales, se ven las distintas clases de materiales magnéticos incluyendo los de polvo de hierro utilizados en frecuencias de microondas. Por último se ven las pérdidas en los materiales magnéticos y se analiza el lazo de histéresis.

En el capítulo 4 se trata el tema de los transformadores, aquí se hace referencia a la conversión de energía en un transformador, las condiciones generales de servicio, condiciones especiales de servicio, clasificación de transformadores, especificaciones eléctricas, especificaciones de nivel de ruido, polaridad de transformadores, designación de terminales, relación de transformación, bancos estrella-delta, y bancos delta-delta.

Mediante las pruebas de vacío y de corto circuito se obtienen los 6 parámetros del transformador. Se ve la forma de conectar tres transformadores monofásicos para formar uno trifásico. Y por último se ven los materiales empleados en la construcción de transformadores comerciales, así como los tipos de transformadores de potencia de alumbrado etc. También se muestran fotografías del transformador tipo poste y el de pedestal entre otros.

En el capítulo 5 se estudian los motores de inducción monofásicos del tipo de rotor jaula de ardilla, aquí se ve la construcción del motor, el principio de funcionamiento, las ecuaciones matemáticas que rigen la velocidad del motor, también se hace una comparación entre los distintos tipos de arranque para estos motores auxiliándonos de las curvas par-velocidad.

En el capítulo 6 se hace referencia a los motores de inducción trifásicos y se comienza haciendo notar las ventajas que los trifásicos tienen en una comparación con los motores monofásicos, se analiza el campo magnético giratorio que se produce en estos motores, se hace referencia a las pruebas de rotor bloqueado y de vacío para obtener el circuito equivalente de parámetros de un motor trifásico. Se ven los diagramas de conexiones para motores de 3, 6, 9 y 12 terminales así como el desarrollo de un devanado trifásico imbricado.

Por último se trata acerca de una perspectiva sobre las tendencias en los motores de inducción trifásicos.



En el capítulo 7 le toca el turno a las máquinas eléctricas más antiguas usadas por el hombre, las máquinas de corriente directa. Aquí se comienza con la comparación entre los voltajes de corriente alterna y de corriente directa, se verá que las máquinas de corriente directa son de construcción más compleja que la de los motores de corriente alterna y por lo tanto requieren de un mantenimiento más continuo. Se verán también las máquinas de autoexcitadas y las excitadas por separado así como los tipos de máquinas autoexcitadas (serie, shunt y compound).

Se analizarán las curvas par-velocidad para los distintos tipos de motores y las curvas de voltaje contra corriente de carga para los distintos tipos de generadores.

Se analizará la potencia, par, velocidad y rendimiento de estas máquinas así como consideraciones técnicas de fabricante como son elevaciones de temperatura y sobrecargas.

Por último se describirá el freno Prony que es un método para probar motores eléctricos y determinar su potencia y par eléctrico.

En el capítulo 8 las máquinas sincrónicas serán vistas desde el punto de vista primeramente de generadores, luego como motores y por último como capacitores sincrónicos.

Como generadores se verán los tipos de máquinas, su construcción, la forma de onda del voltaje generado así como las ecuaciones matemáticas que rigen el funcionamiento de estas máquinas.

Como motores se verá su aplicación práctica, precauciones y métodos de arranque y la construcción del devanado amortiguador y los alcances en cuanto a mover cargas se refiere.

Y como capacitores sincrónicos se verá que es una alternativa bastante buena para la corrección de factor de potencia en la industria.

Por último se hablará sobre los motores sincrónicos de imán permanente sin escobillas y de los motores supersincrónicos.

En el capítulo 9 se hablará de los motores de corriente directa sin escobillas mejor conocidos en Inglés como los “Brushless D.C. Motor”, aquí se describirá su funcionamiento y construcción, así como los diferentes tipos de diseñarlos.

Se verá el rango de alcance en cuanto aplicaciones, voltajes y pares de trabajo para esto anexando hojas técnicas de los fabricantes de estos motores.

También se verán ejemplos de aplicaciones en la industria aeronáutica y espacial.

En el capítulo 10 se analizará uno de los motores más empleados en la actualidad por máquinas electrónicas como impresoras, copiadoras, sistemas de satélite, etc. Nos referimos al motor de pasos mejor conocido en Inglés como “Stepping Motor”. Aquí se verá la forma en que se construyen, las aplicaciones y alcance de éstas así como la manera de funcionar a base de “drivers” electrónicos.

Se verán las diferencias entre estos motores y los convencionales de corriente directa, las características más comunes, y los diferentes tipos de motores de paso.

Se incluyen también hojas técnicas del fabricante con diversos circuitos integrados que son los “drivers” que mueven a estos motores.

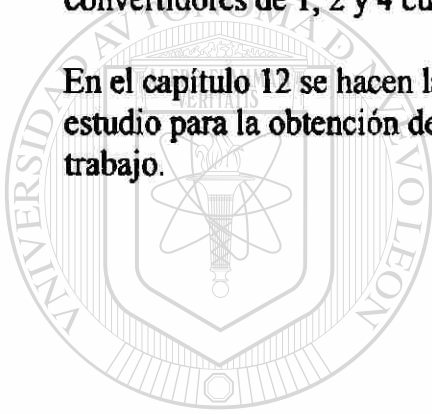
En el capítulo 11 se verán las tres técnicas más empleadas en el control electrónico de motores, se explicarán los conceptos de control de velocidad y regulación de velocidad que a veces se confunden por parte del estudiante, también el concepto de la retroalimentación y los dispositivos utilizados para obtener esta señal.

También se analizarán por separado los controles de velocidad para motores de corriente alterna y los controles de velocidad para los motores de corriente directa

Se describirá primero los reguladores de velocidad de corriente alterna llamados inversores. Aquí se verán los tipos, componentes, funcionamiento y aplicaciones el inversor tipo vector así como los diagramas electrónicos asociados con el mismo, diagrama de conexiones y modelos de mercado. También se analizará el método PAM y PWM así como los modernos módulos hechos a base de transistores bipolares de compuerta aislada (IGBTs).

En los reguladores de velocidad de corriente directa se verán sus componentes, funcionamiento, métodos de control, tipos de “drives” utilizados en la industria, convertidores de 1, 2 y 4 cuadrantes y las aplicaciones.

En el capítulo 12 se hacen las recomendaciones a las personas que puedan usar esta guía de estudio para la obtención de información, así como las conclusiones que el autor da de este trabajo.



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 2. INTRODUCCION

### 2.1 Objetivo

Proporcionar los conocimientos básicos que el Ingeniero en Electrónica debe de tener para poder analizar el funcionamiento de las maquinas eléctricas, así como también poder analizar y diseñar los controles electrónicos que se emplearan en las mismas.

Al finalizar el curso el alumno deberá de ser capaz de comprender y analizar los circuitos magnéticos, transformadores monofasicos y trifasicos, maquinas eléctricas de corriente alterna y de corriente directa, maquinas sincrónicas así como también tendrá las herramientas para el análisis y diseño de los dispositivos de control electrónicos para el control de voltajes, corrientes, potencias, velocidad etc. empleando las nuevas tecnologías en el área de electrónica como por ejemplo el uso de microprocesadores y de la electrónica de potencia del estado sólido.

también se dedica una parte del trabajo al estudio de los “Brushless d.c.” motor que es la novedad tecnológica ya que cuentan con conmutador electrónico e imanes permanentes.

### 2.2 Justificación

Mi experiencia en el área profesional y sobretodo en el área docente corrobora que en el tiempo de un semestre escolar, el dar tanta información al alumno sobre los distintos tipos de maquinas eléctricas, así como las herramientas en electrónicas necesarias para su control ha llegado a ser problemático, porque no existen muchos libros de texto que integren toda esa información.

Es por eso que se propone un texto con la cantidad y variedad de contenidos que se requieren dándoles la profundidad matemática necesaria que se requiera, así como también se proponen las practicas de laboratorio para la demostración de los temas.

Espero que esta propuesta resulte ser benéfica para elevar el nivel de impartición de la clase.

### 2.3 Metodología

Para la elaboración del programa de clase y del texto de apoyo se tomara como base la experiencia del personal docente del Departamento de Eléctrica de FIME así como también la retroalimentación de ex-alumnos ahora ya gente involucrada en procesos industriales, afines al área de maquinas eléctricas.

También se desarrollaran las practicas de Laboratorio y se tomara como base el equipo con el que se cuenta proporcionando de antemano los resultados a obtener.

### 2.4 Revisión Bibliográfica

Se han escrito infinidad de libros sobre los temas de maquinas eléctricas, pero considero que ninguno de ellos abarcando toda la gama de motores que aquí se tratan y tampoco son lo suficientemente versátiles para hacer que el alumno conozca mediante fotografías la información de productos de mercado.

## 3. CIRCUITOS MAGNETICOS

### 3.1 Introducción

Hoy es difícil tener cierto interés en la electrónica sin que se esté interesado también, en una forma u otra, en el magnetismo o el electromagnetismo. Considérense, por ejemplo, las muchas aplicaciones del electromagnetismo en los receptores modernos de televisión con sus bocinas, imán de centrado, imanes de pureza y enfoque, yugo de reflexión y varios tipos de transformadores y reactores.

En otras ramas de la electrónica, como por ejemplo en el campo de las computadoras o instrumentos de navegación (por mencionar solo dos) esta bien establecida la importancia del magnetismo y del electromagnetismo. La industria electrónica es dependiente del apoyo prestado por las compañías que se especializan en la fabricación de materiales magnéticos y electromagnéticos, y de otros componentes.

### 3.2 Imanes naturales y artificiales

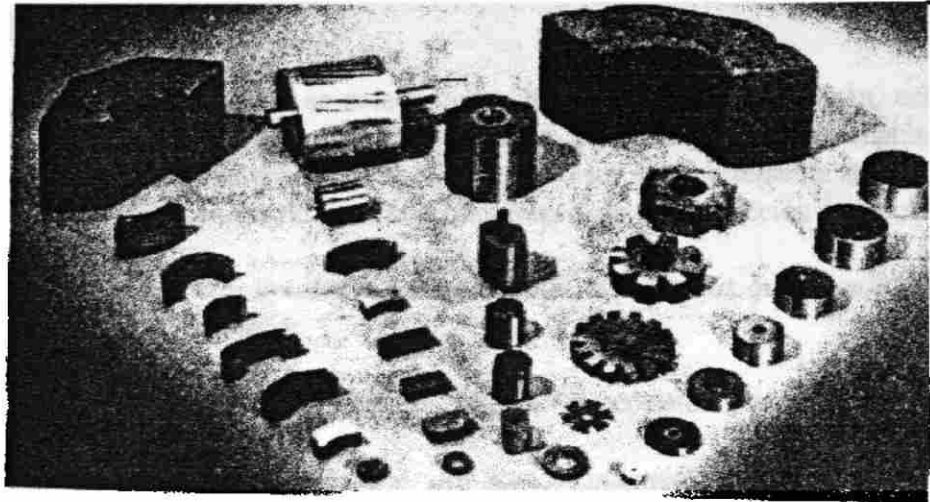
Los imanes naturales se encuentran en forma de depósitos de materiales conocidos como magnetitas, o con más frecuencia piedra imán. Esta forma de sustancia magnética se conoce desde el año 600 d.c. Cualquier otro tipo de imán es artificial. Los primeros imanes artificiales fueron hechos por contacto de piezas de hierro con magnetita. Incluso hoy, para aplicaciones menores, se pueden hacer ocasionalmente, imanes por medio del frotamiento suave de una pieza de hierro o acero con cualquier imán de que se disponga.

Si una pieza de hierro dulce se magnetiza por inducción a partir de una fuente magnética, pierde rápidamente la mayor parte de su magnetismo inducido después de que la fuente magnetizante se retira. Sin embargo, si una piedra de acero templado o hierro colado se magnetiza, el magnetismo inducido permanecerá durante un tiempo extremadamente largo.

Los materiales magnetizados que pierden rápidamente la mayor parte de su magnetismo inducido se llaman imanes *temporales*. Los que retienen su magnetismo se denominan imanes *permanentes*.

Los imanes permanentes se hacen de hierro forjado, acero templado o a partir de varios tipos de aleaciones de acero utilizados para imanes permanentes de altavoces y de medidores eléctricos.

En la figura 1 se muestra una variedad de imanes permanentes que se utilizan para hacer motores eléctricos y otros tipos de componentes eléctricos y electrónicos.



**Figura 1.** Dispositivos de imán permanente utilizados Para motores y para otras aplicaciones.

### 3.3 Materiales Magnéticos

Cuándo se habla de materiales magnéticos, normalmente la referencia es a sustancias que son fuertemente atraídas por imanes o campos magnéticos. Sustancias de este tipo se denominan *ferromagnéticas* o *ferrimagnéticas*. Las sustancias ferromagnéticas son definidas de acuerdo con los diferentes tipos de hierros y aceros, incluyendo los materiales de núcleos de polvo de hierro, que se utilizan en la fabricación de algunas bobinas de radiofrecuencia.

Las sustancias ferrimagnéticas son las ferritas y otros óxidos que se utilizan como materiales para los núcleos de bobinas que operan a la frecuencia de las microondas, en transformadores de pulsos de alta frecuencia de las microondas, en transformadores de pulsos de alta frecuencia como el transformador de salida horizontal del televisor, y en la memoria de las unidades de conmutación de las computadoras de alta velocidad.

Los materiales magnéticos se pueden clasificar como si fueran magnéticamente *blandos* o magnéticamente *duros*. Los materiales magnéticamente blandos son los utilizados en los núcleos de potencia y en los transformadores y reactores de audiofrecuencia. Los materiales magnéticamente duros se utilizan para construir imanes permanentes.

Elementos como el aluminio, cromo, manganeso y el aire, que incluso durante la aplicación de campos magnéticos intensos tienen solamente un efecto de atracción muy débil y raramente detectable, se llaman *paramagnéticos*. Otros como el bismuto, antimonio, cobre, plata y algunos más, en los cuales la aplicación de campos magnéticos intensos tiene un efecto repulsivo difícilmente perceptible, se llaman *diamagnéticos*. La mayor parte de los *materiales* con excepción de aquellos que son ferromagnéticos o ferrimagnéticos, son comúnmente denominados no magnéticos. Los materiales *no magnéticos* si permiten que el magnetismo pase a través de ellos, pero jamás llegan a magnetizarse intensamente.

### 3.4 Polos Magnéticos

Cuando el polo norte de un imán se coloca cerca del polo norte de otro imán, existe entre ellos una fuerza de repulsión. De la misma manera, existe una fuerza de repulsión entre dos polos magnéticos sur, pero un polo norte y un polo sur son fuertemente atraídos.

Esta característica del magnetismo esta expresada en la ley de atracción y repulsión magnética, la cual establece que:

*Cuando los polos magnéticos son iguales, se repelen entre si, mientras que aquellos que son diferentes se atraerán mutuamente.*

La ley de Coulomb define que la magnitud de atracción o repulsión puede establecerse como sigue:

*La fuerza de atracción o repulsión entre dos polos magnéticos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los polos, y directamente proporcional al producto de las intensidades de los polos.*

### 3.5 El Polo Magnético Unitario

Para utilizar la ley de Coulomb durante el cálculo, se debe tener algún método específico para designar con precisión la intensidad particular de un polo magnético, en términos de alguna unidad. Esta unidad es el polo unitario, derivado de la ley de Coulomb y basado en el concepto de que dos polos magnéticos de igual intensidad se pueden seleccionar para que cada uno de ellos se repela con respecto al otro con la fuerza de una dina, cuando la distancia entre los polos es exactamente de un centímetro. Por ello, a partir de este concepto, se obtiene la siguiente definición de polo magnético unitario:

*El polo magnético unitario es de tal intensidad que repelerá a uno exactamente similar, con la fuerza de una dina, cuando la distancia entre los polos es de un centímetro.* ®

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

De la ley de Coulomb se puede obtener la siguiente ecuación, para calcular la fuerza de atracción o repulsión entre dos polos magnéticos:

$$F = \frac{M_1 * M_2}{d^2}$$

*En donde:* F = fuerza entre los polos, dinas  
 M<sub>1</sub> = intensidad del primer polo, polos unitarios  
 M<sub>2</sub> = intensidad del segundo polo, polos unitarios  
 d = distancia entre los polos, cm

### 3.6 El Campo Magnético De La Tierra

Por lo que se conoce sobre polos magnéticos, es evidente que la única razón por la cual la brújula magnética funciona, como ya se sabe, es que la misma Tierra forma un imán muy grande con uno de sus polos en el norte, y con el otro precisamente opuesto a él, en el sur. El polo magnético de la Tierra que se encuentra localizado en el Norte *geográfico*, es realmente un polo *sur magnético*.

### 3.7 Electromagnetismo

Si una brújula se acerca a un conductor de corriente continua, como se muestra en la fig.2 la aguja de la brújula en la dirección mostrada. Si la corriente a través del conductor se invierte, la aguja de la brújula girará y apuntará en la dirección opuesta.

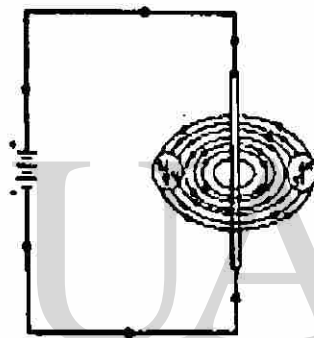
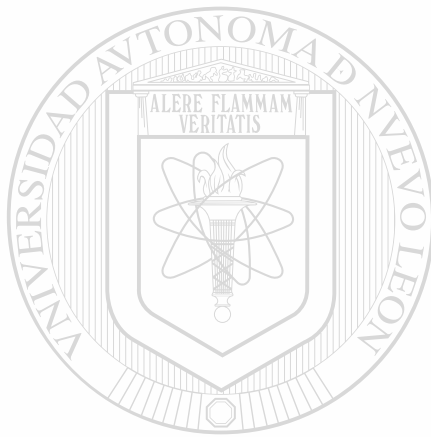


Figura 2. Campo magnético rodeando un Conductor de corriente

Por consiguiente, puede observarse que un conductor de corriente eléctrica está circundado por un campo magnético.

Se dice que el campo magnético sale del imán a través de su polo norte, y entra al imán a través de su polo sur. En realidad las líneas del campo no se mueven. En vez de ello su dirección está definida como la dirección en que un polo norte unitario se movería si se colocara en el campo. De hecho, no existe un polo norte unitario en la vida real, pero es un concepto imaginario útil para definir la dirección de los campos magnéticos.

### 3.8 La Regla De La Mano Derecha En Campos Magnéticos Alrededor De Alambres.

Para determinar la dirección de un campo magnético que circunda cualquier conductor que conduce corriente se deberá utilizar la siguiente regla ilustrada en la fig. 3.

**REGLA:** *Tómese el alambre en la mano derecha y haga que el dedo pulgar apunte en la dirección convencional de la corriente (es decir, corriente de positivo a negativo) que está circulando a través del alambre. Los demás dedos, entonces, apuntarán en la dirección correspondiente al campo magnético o líneas de fuerza, que rodean al alambre.*

### 3.9 La Regla De La Mano Derecha Para Bobinas.

Cualquier bobina o solenoide por la que circule una corriente presenta efectos magnéticos, y los efectos magnéticos son siempre de naturaleza bipolar. Cualquier bobina por la que circula una corriente deberá tener siempre dos polos, el norte y el sur. Para determinar la polaridad magnética de una bobina por la que circula una corriente, se utiliza la regla de la mano derecha para bobinas ver fig. 8.

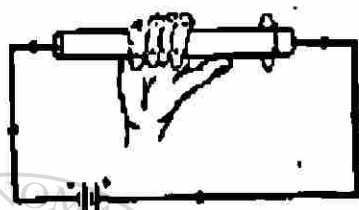


Figura 3. Regla de la mano derecha para determinar la dirección del campo magnético alrededor de un conductor por el que circula una corriente. (Se muestra el sentido convencional de la corriente).

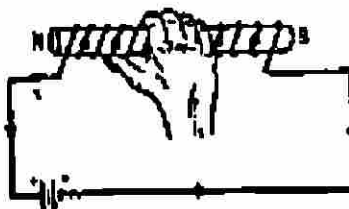


Figura 4. Regla de la mano derecha para determinar la polaridad magnética de una bobina.

**REGLA:** Tómese la bobina en la mano derecha y hágase que los dedos apunten en la dirección convencional de la corriente alrededor de la bobina; el dedo pulgar apuntará entonces en la dirección del polo norte de la bobina.

### 3.10 Unidades De Medición En Magnetismo

Las unidades básicas de medición en electricidad son los amperes, los volts y los ohms. Sería muy conveniente que solamente fueran tres unidades básicas en magnetismo, pero desafortunadamente este no es el caso. Contrariamente, existen varios sistemas de medición, y no hay un sistema universal único. (Se ha sugerido que el sistema mks sea el sistema universal de medición lógico en magnetismo, pero hasta este momento la literatura de los fabricantes estadounidenses no define a sus productos en términos exclusivos del sistema mks.)

Una manera de entender la gran cantidad de unidades para mediciones magnéticas consistiría en describir todas las unidades en un sistema particular. Por ejemplo, el método para la medición del flujo, la densidad de flujo, la fuerza magnetomotriz, etc., en el sistema cgs podría describirse con cuidado, y posteriormente al finalizar la exposición, se podría incluir una tabla de conversión, para cambiar del sistema cgs a cualquier otro sistema.

Otro método consiste en describir cada uno de los términos y su unidad de medición en el sistema que describe ese término en particular de la manera más sencilla. De esta manera, se medirá la unidad de *flujo* en términos correspondientes al sistema cgs, y la unidad de la



fuerza magnetomotriz en términos correspondientes al sistema *mks*. Después se incluirá una tabla para convertir de un sistema a otro.

### 3.11 Flujo Magnético ( $\phi$ )

Los campos magnéticos existen en las líneas de fuerza, y se denomina flujo. En el sistema cgs, a cada línea individual del flujo se le denomina *maxwell*. Si hay tres líneas de flujo, se dice que la cantidad de flujo es de tres maxwell en el sistema cgs, mientras que en sistema inglés simplemente se define como tres *líneas*. Cuanto más grande sea el número de líneas de flujo, mas fuerte será el campo magnético.

Las líneas son imaginarias, y el concepto de líneas de flujo probablemente viene desde la aparición del popular experimento en el que las partículas de hierro limado tienden a alinarse por si mismas en un grupo de líneas, como se muestra en la figura la figura 5. Estas son líneas con intensidad magnética idéntica.

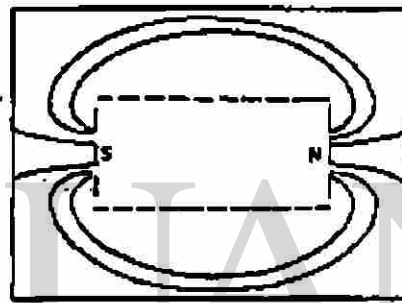
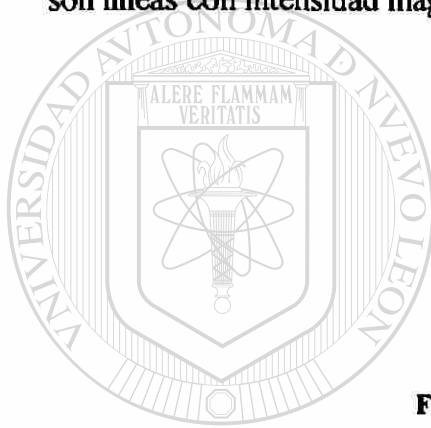


Figura 5. Disposición de limaduras de hierro sobre una hoja de papel que cubre una barra magnética.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

### 3.12 Densidad De Flujo (B)

Si una línea de flujo pasa perpendicularmente a través de un centímetro cuadrado de esta pagina, existirá por lo tanto cierta cantidad de fuerza del campo magnético. Si *dos* líneas de flujo pasan a través del mismo centímetro cuadrado, la fuerza del campo será por consiguiente, el doble del valor del flujo correspondiente a cuando se tenia solamente una línea. Si tres líneas de flujo pasan a través de ese mismo centímetro cuadrado, la fuerza del campo será tres veces mayor, y así sucesivamente.

Fácilmente se puede comprender que al pasar tres líneas de flujo sobre un centímetro cuadrado se producirá una concentración de campo magnético cuya fuerza será mayor que la producida por dos líneas de flujo que pasaran por el mismo centímetro cuadrado. Una forma importante para definir la fuerza de un campo magnético es, por consiguiente, en términos de numero de líneas de flujo que pasan a través de un área de un centímetro cuadrado. Es obvio que un imán muy fuerte hará que más líneas de flujo pasen a través de un centímetro cuadrado de área , que las originadas por un imán débil. Este efecto se ilustra en la figura 6.

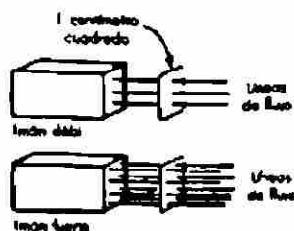


Figura 6. El imán fuerte Causará más líneas de flujo Por centímetro cuadrado que el débil.

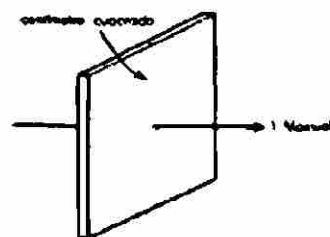


Figura 7. Ilustración de un gauss de densidad de flujo.

El número de líneas de flujo que pasan a través de un centímetro cuadrado de área se denomina densidad de flujo. En el sistema cgs, la unidad de la densidad de flujo es el *gauss*. Cuando un maxwell (es decir una línea de flujo) pasa a través de un área de sección transversal de un centímetro cuadrado, se dice que la densidad de flujo es igual a un gauss. En la fig. 7 se ilustra la densidad de flujo correspondiente a un gauss, que es una unidad de medición en el sistema cgs.

### 3.13 Fuerza Magnetomotriz (Fmm)

Las líneas de fuerza pueden establecerse de diferentes formas. Una de las más sencillas consiste en utilizar una corriente eléctrica. Todas las corrientes eléctricas tienen asociado un campo magnético. La fuerza que origina el establecimiento de un flujo magnético se denomina fuerza magnetomotriz. Esta puede compararse con el voltaje en electricidad, que en ocasiones se considera como la "fuerza" que produce una corriente eléctrica.

La unidad más fácil de comprender respecto a la fuerza magnetomotriz es el *ampere-vuelta*. Si una corriente de un amperio circula a través de una vuelta de alambre, se dice que la fuerza magnetomotriz es de un amperio-vuelta.

La fuerza magnetomotriz siempre es igual al número de amperes de corriente multiplicado por el número de vueltas del alambre. El amperio-vuelta es una unidad de medición del sistema mks. (En el sistema cgs se utiliza el gilbert como unidad de la fmm. Un gilbert = 1.257 X amperio-vuelta).

### 3.14 Reluctancia (R)

Cuando una fuerza magnetomotriz se utiliza para establecer el flujo en un material, siempre hay una oposición al flujo. A esta oposición se le llama *reluctancia*. No hay unidades *inglesas* de medición para la reluctancia. Se ha propuesto al termino *rel*, pero no es de uso común. La reluctancia en el sistema cgs se mide *gilberts por maxwell*, pero no hay un nombre común para la unidad de la reluctancia, y no hay un nombre para ella en el sistema mks.

En circuitos magnéticos, algunas veces es más conveniente conocer la facilidad con que se establecen las líneas de flujo en un material, mas que la oposición que el material ofrece al establecimiento del flujo. La facilidad con la cual las líneas de flujo pueden establecerse en un material se denomina *permeabilidad* del material y es el recíproco de la reluctancia.

### 3.15 Comparación de Circuitos Eléctricos y Magnéticos

Existe una similitud entre las unidades eléctricas y magnéticas. En la tabla siguiente se listan los términos eléctricos más importantes y los términos magnéticos comparativos.

Comparación de términos eléctricos y magnéticos

Unidades eléctricas	Unidades magnéticas
Corriente eléctrica $I$	Flujo magnético $\phi$
Fuerza electromotriz $E$	Fuerza magnetomotriz, fmm
Resistencia $R$	Reluctancia $R$
Conductancia $G$	Permeabilidad $P$

Hay ciertos conceptos acerca de los circuitos eléctricos que son bastante diferentes de los circuitos magnéticos, lo cual deberá recordarse. En un circuito eléctrico, toda la corriente está normalmente confinada al conductor que la está conduciendo. En un circuito magnético, algunas de las líneas de flujo dejan realmente el circuito a lo largo de la ruta, de tal manera que es más difícil calcular la cantidad de flujo en cierto punto, en comparación con el cálculo de corriente en un circuito eléctrico.

La resistencia de un alambre o resistor es de un valor fijo para un circuito en particular en un intervalo de corrientes para el cual se pretende utilizar. En un circuito magnético, la cantidad de reluctancia es dependiente de la cantidad de flujo presente. Cuanto mayor sea la cantidad de flujo presente en una pieza de hierro, mayor será la reluctancia que se llegue a tener, es decir, mayor será la oposición a un incremento en el flujo.

En los circuitos eléctricos hay materiales aislantes que ofrecen la gran oposición a la circulación de corriente. En los circuitos magnéticos no hay materiales que impidan el establecimiento del flujo. Para evitar la entrada del flujo de las líneas magnéticas a un área en particular, el único mecanismo que puede emplearse consiste en la utilización de una trayectoria con un valor muy bajo de reluctancia alrededor de esa área.

En estos casos, casi todas las líneas de flujo, seguirán la trayectoria de más baja reluctancia, y por ello no entrarán en la región protegida.

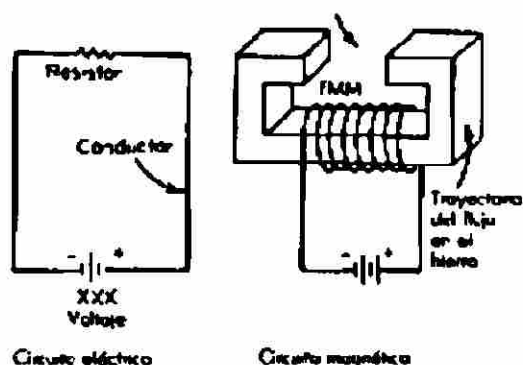


Figura 8. Comparación de un circuito eléctrico y uno magnético.

Un resistor en el circuito eléctrico ofrece una oposición a la circulación de la corriente. En el circuito magnético, el espacio de aire ofrece una oposición muy superior a la ofrecida por la trayectoria del hierro para el establecimiento del flujo. Por lo tanto, puede pensarse que el espacio o ranura de aire equivale a un resistor en el circuito magnético.

UNIDAD	CGS	MKS	INGLÉS
Flujo	Maxwell	Webers	Líneas
Fuerza magnetomotriz	Gilberts	Ampere-vueltas	Ampere-vuelta
Fuerza magnetizante	Oersteds	Ampere-vuelta por metro	Ampere-vueltas por pie
Reluctancia	Gilberts por maxwells	Ampere-vueltas por weber	Sin unidades (se ha sugerido el rel)
Densidad de flujo	Maxwells por centímetro cuadrado	Webers por metro cuadrado	Líneas por pulgada cuadrada

### FACTORES DE CONVERSION

Pulgadas = centímetros x 2.54

Maxwells x  $10^8$  = webers

Gilberts x  $10/4\pi$  = ampere-vuelta

Oersteds x  $10^3/\pi$  = ampere-vuelta

Gauss (maxwells por centímetro cuadrado) x  $10^{-4}$  = webers por metro cuadrado

1 gamma =  $10^{-5}$  gauss

Tabla 1. Conversión de unidades magnéticas en distintos sistemas

### 3.16 Fuerza Magnetizante (H=Intensidad De Campo Magnético)

La circulación de un ampere de corriente a través de una vuelta de alambre proporcionará una fuerza magnetomotriz de un ampere-vuelta (La fmm en ampere-vuelta = número de amperes por el número de vueltas de alambre). De igual forma, la circulación de una ampere de corriente a través de diez vueltas de alambre proporcionará una fuerza magnetomotriz de diez ampere-vuelta. Supóngase ahora que se devanan muy justamente las diez vueltas, de tal forma que cada una de las vueltas está muy apretada contra las vueltas adyacentes. En el sistema mks, la *fuerza magnetizante* se mide en ampere-vuelta por metro. En el sistema cgs se utiliza el oersted. Un gilbert por centímetro proporciona una fuerza magnetizante de un oersted.

### 3.17 Permeabilidad Magnética ( $\mu$ )

La permeabilidad relativa, que muy frecuente y sencillamente se llama permeabilidad, es la relación de la densidad de flujo en un material para una fuerza magnetizante determinada con respecto a la densidad de flujo que se producirá en el vacío para la misma cantidad de fuerza magnetizante. Matemáticamente, la permeabilidad relativa en el sistema cgs se expresa por la siguiente ecuación :

$$\mu = \frac{B}{H}$$

$\mu$  = permeabilidad relativa del material

$B$  = densidad de flujo

$H$  = intensidad de campo magnético

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

La permeabilidad relativa no tiene unidades. La permeabilidad relativa depende del tipo de material. En otras palabras, diferentes tipos de material tendrán un valor diferente de permeabilidad relativa. Por ejemplo, la permeabilidad relativa del aire, al igual que la del vacío es uno. Para todos los materiales paramagnéticos, la permeabilidad relativa es ligeramente mayor a uno. La permeabilidad relativa de los materiales diamagnéticos es menor que uno, mientras que la permeabilidad relativa de materiales ferromagnéticos es mucho mayor que uno (y también mucho mayor que la permeabilidad relativa de los materiales paramagnéticos).

Una permeabilidad relativa mayor que uno significa simplemente que es más fácil y accesible para establecer líneas de flujo en ese material, en comparación con el establecimiento de las líneas de flujo en el vacío. Un material que tiene una permeabilidad relativa menor que uno, significa que es más difícil establecer líneas de flujo en ese material que establecerlas en el vacío.

### 3.18 Ley De Rowland

La ley de Rowland expresa la relación entre la fuerza magnetomotriz, el flujo y reluctancia. Algunas veces se denomina *ley de Ohm para circuitos magnéticos*.

Las tres cantidades fundamentales, el maxwell  $\phi$  el gilbert ( $F$ ) y la unidad de reluctancia ( $R$ ) se utilizan en la ley de Rowland como se indica a continuación:

$$F_{mm} = \phi R$$

donde:  $F_{mm}$  = fuerza magnetomotriz, Gb

$\phi$  = flujo, Mx

$R$  = reluctancia, Gb/Mx

Debido al hecho de que la reluctancia en un circuito magnético no es lineal, la ley de Rowland no es tan flexible como la ley de Ohm para circuitos eléctricos. La reluctancia del circuito es solo un valor dado cuando esta presente cierta cantidad de flujo. Si se cambia el flujo, se cambia la reluctancia.

Para resumir, los circuitos magnéticos no son lineales. No se puede aplicar una ecuación lineal, como por ejemplo  $I = E/R$  o  $\phi = f_{mm}/R$ , a circuitos no lineales, para cualquier condición posible en el circuito.

### 3.19 Reluctancias en Serie

Para determinar la reluctancia total de cualquier número de reluctancias en serie, simplemente se suman precisamente de la misma forma que se sumarían las resistencias para determinar la resistencia total de un número de resistores en serie.

### 3.20 Reluctancias en Paralelo

La permeancia de cualquier circuito magnético es igual a 1 dividido por la reluctancia total del circuito, o

$$P = \frac{1}{\text{Reluctancia}} = \frac{1}{R}$$

La permeancia en circuitos magnéticos puede asemejarse a la conductancia en circuitos eléctricos, y se utiliza para calcular la reluctancia combinada de varias reluctancias en paralelo, precisamente de la misma manera que la conductancia se utiliza para calcular resistencias en paralelo. Para determinar la reluctancia combinada de cierto número de reluctancias en paralelo, se considera el recíproco de la suma de las permeancias de las trayectorias separadas.

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}}$$

en donde  $R$  = reluctancia combinada y  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$  = reluctancias de las trayectorias separadas.

### 3.21 Curva de Imanación

Debido a que la reluctancia de una sustancia magnética no es constante, sino que varía con los cambios en la densidad de flujo, la permeabilidad de una sustancia magnética también variará con cualquier cambio en la densidad de flujo. La razón de esto es que la reluctancia de un material magnético varía con cualquier cambio en el flujo. Por supuesto, la reluctancia de un cubo de solo 1 cm de ese material, también variará al mismo tiempo. La reluctancia de un cubo de 1 cm de cualquier material es su reluctividad, y la permeabilidad es igual a uno dividido por la *reluctividad*. De esto se obtiene, que la permeabilidad de un material magnético también variará con cualquier cambio en el flujo.

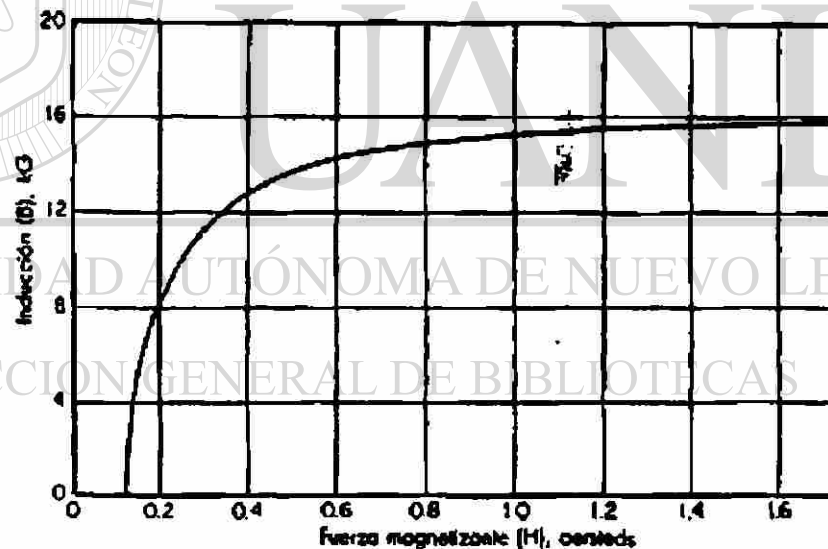


Figura 9. Curva típica de magnetización de cc, de un núcleo de Sillectron de 12 mils sin corte y sin impregnar.

Debido a que el cambio en la reluctancia no será directamente proporcional al cambio en el flujo, el cambio en la permeabilidad tampoco será directamente proporcional a cambios en el flujo. Estos hechos deberán ser siempre tomados en consideración cuando se realicen los cálculos de circuitos magnéticos.

Las curvas y las tablas de magnetización que muestran la relación entre  $B$  y  $H$  o entre  $B, H$  y  $\mu$ , en varias etapas de magnetización para diferentes grados de acero y hierro, y varios otros tipos de materiales magnéticos se ponen a la disposición del usuario por parte de los fabricantes de transformadores de acero y otros materiales de núcleo.

Las curvas de magnetización pueden tomar diferentes formas. Algunas pueden ser detalladas en papel lineal común para gráficas, mientras que otras deben ser realizadas en papel logarítmico o semilogarítmico. El empleo de las curvas de magnetización simplifica grandemente la solución de problemas sobre circuitos magnéticos. Las curvas de magnetización típicas se muestran en la figura 9.

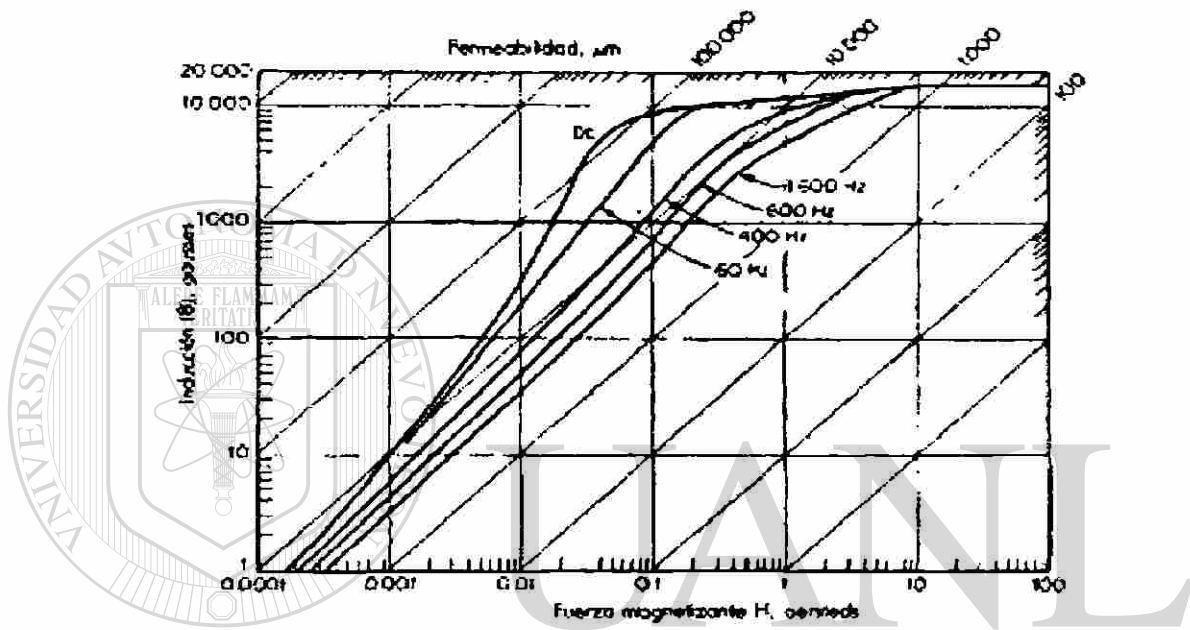


Figura 10. Curvas de magnetización para 0.014 con una inducción y permeabilidad de 4750 contra la fuerza magnetizante: tipo AL 4750, calibre 0.014 in, maestreado de anillos 1.9 por 2.5 in.

### 3.22 Cálculos con Circuitos Magnéticos

La resistencia de un conductor eléctrico es igual a la resistencia específica o resistividad del conductor, multiplicada por su longitud y dividida por su área de sección transversal. De la misma manera la reluctancia de un material magnético (o conductor de flujo o líneas de fuerza) es igual a la reluctancia específica, o reluctividad del material magnético multiplicado por la longitud del material y dividido entre su área de sección transversal. En otras palabras, cuando la longitud de un circuito magnético aumenta la reluctancia aumenta proporcionalmente; pero cuando el área de sección transversal aumenta, disminuye proporcionalmente. Por lo tanto, la reluctancia de un circuito magnético es directamente proporcional a su longitud e inversamente proporcional al área de su sección transversal. y la ecuación para determinar la reluctancia puede escribirse en la forma siguiente:



$$R = \frac{(1/\mu) * L}{A}$$

en donde:  $R$  = reluctancia en unidades  
 $\mu$  = permeabilidad  
 $L$  = longitud del circuito magnético  
 $A$  = área de sección transversal del  
 Circuito magnético

Si  $L$  esta dada en metros.  $A$  estará en metros cuadrados, pero si  $L$  esta dada en centímetros,  $A$  estará en centímetros cuadrados. La división de 1 entre la permeabilidad de una sustancia magnética para obtener su reluctividad es un procedimiento similar al utilizado para obtener la resistividad, o resistencia especifica de un conductor eléctrico al considerar el reciproco de su conductividad.

La ecuación básica fundamental, para determinar el flujo total puede ahora reescribirse como:

$$\phi = \frac{Fmm}{R} = \frac{Fmm}{(L/\mu A)}$$

en donde:  $Fmm$  = Fuerza magnetomotriz en ampere-vueltas  
 $\mu$  = permeabilidad  
 $A$  = area de sección transversal  
 $L$  = longitud

### 3.23 Electroimanes

La potencia de arrastre o fuerza de tracción de un electroimán puede calcularse a partir de una ecuación derivada de la definición fundamental de un polo magnético unitario. Un polo magnético unitario es un polo con una fuerza tal que repelería un polo similar con exactamente la fuerza de una dina cuando la distancia entre los polos es de un centímetro.

La ecuación fundamental del cálculo del electroimán es

$$T = \frac{AB^2}{72134000}$$

en donde:  $T$  = arrastre, libras  
 $A$  = área de sección transversal de  
 De las caras del polo  $\text{in}^2$   
 $B$  = densidad de flujo, líneas/ $\text{in}^2$

### 3.24 Saturación

Se dice que cualquier material magnético está saturado, cuando un mayor aumento en la fuerza magnetizante, o en la intensidad del campo, no puede ya ocasionar un aumento en la densidad de flujo del material. El valor de la densidad de flujo en el material del núcleo de cualquier circuito electromagnético es de considerable importancia; este valor dependerá del uso del material magnético.

Si el núcleo de un transformador en el circuito de placa de la salida de potencia de una válvula llega a saturarse magnéticamente, dará como resultado una distorsión intensa y una transferencia de energía escasa del primario al secundario. Si la corriente de polarización en la cabeza reproductora de una grabadora de cinta es bastante alta o bastante baja, cualquier información reproducida se distorsionará en gran medida. Por otra parte, algunos dispositivos electromagnéticos operarán sólo de manera muy baja, o nula, si la densidad de flujo inicial en el material del núcleo no está a su valor máximo. El punto de saturación de cualquier hierro o acero magnético puede determinarse muy fácilmente a partir de su curva de magnetización  $B-H$ .

### 3.25 Retentividad

Una medida de la retentividad es la cantidad de magnetismo, o valor de  $B$ , que permanece en un material magnético después de que la fuerza magnetizante se ha elevado a un valor más que suficiente para saturar al material y después reducirse a cero; el valor de  $B$  que permanece en el material se llama magnetismo residual o remanente. Si dos imanes permanentes del mismo tamaño, de materiales distintos, son magnetizados hasta saturarlos, el que tenga una característica permanente más fuerte, tendrá por lo tanto, una retentividad más alta. Sin embargo, esto no significa necesariamente que el imán más fuerte será el más difícil de desmagnetizar, ya que esto depende de otros factores además del de retentividad.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### 3.26 Coercitividad o Fuerza Coercitiva

La coercitividad es el valor de la fuerza magnetizante que se opone y que es necesaria para reducir el magnetismo residual o remanente, en una sustancia magnética, hasta un valor de cero. Un concepto claro de coercitividad puede obtenerse si se estudia la figura 11. Supóngase que el núcleo de hierro de la bobina no está magnetizado, y que el ajuste del potenciómetro está en el punto medio, o cero. Cuando el ajuste del potenciómetro se mueve hacia el punto  $a$ , el material del núcleo llegará a magnetizarse hasta la saturación, a lo largo de la curva de magnetización  $A-B$ . Si después el ajuste del potenciómetro se regresa hacia el centro, o a la posición cero, la densidad de flujo  $B$  en el núcleo no regresará a cero por la línea  $A-B$  de la curva, sino que lo hará a través de la línea  $B-C-D$ , y cuando el ajuste del potenciómetro se encuentre nuevamente en cero, la densidad de flujo todavía estará en el punto  $c$ . Este será el magnetismo residual, o remanencia, indicado por el símbolo  $B_r$ . Para reducir la remanencia a cero, es necesario mover el ajuste del potenciómetro hacia el punto  $b$  para producir una fuerza de magnetización opuesta al campo residual en el núcleo. Esto

ocasionará que el campo residual regrese a cero a lo largo de la línea desde  $C$  a  $D$ . El valor negativo de  $H$  necesario para reducir el magnetismo residual en el núcleo a un valor de cero es la coercitividad del material del núcleo. La coercitividad se representa por el símbolo  $H_c$ .

Si el ajuste del potenciómetro se mueve todavía más hacia la izquierda, de nuevo se magnetizará el núcleo, pero la magnetización será ahora en una dirección negativa.

(Esto se basa en la suposición de que la dirección original era positiva.) Enseguida ocurrirá la saturación en el punto  $E$  de la curva de magnetización. Si el valor negativo de  $H$  es ahora reducido a cero y después incrementado nuevamente a su valor positivo más alto, al mover el ajuste del potenciómetro hacia la derecha, la densidad de flujo en el núcleo, seguirá una nueva línea desde  $E$  hasta  $F$ , o cero, y después subirá de regreso al punto  $B$ .

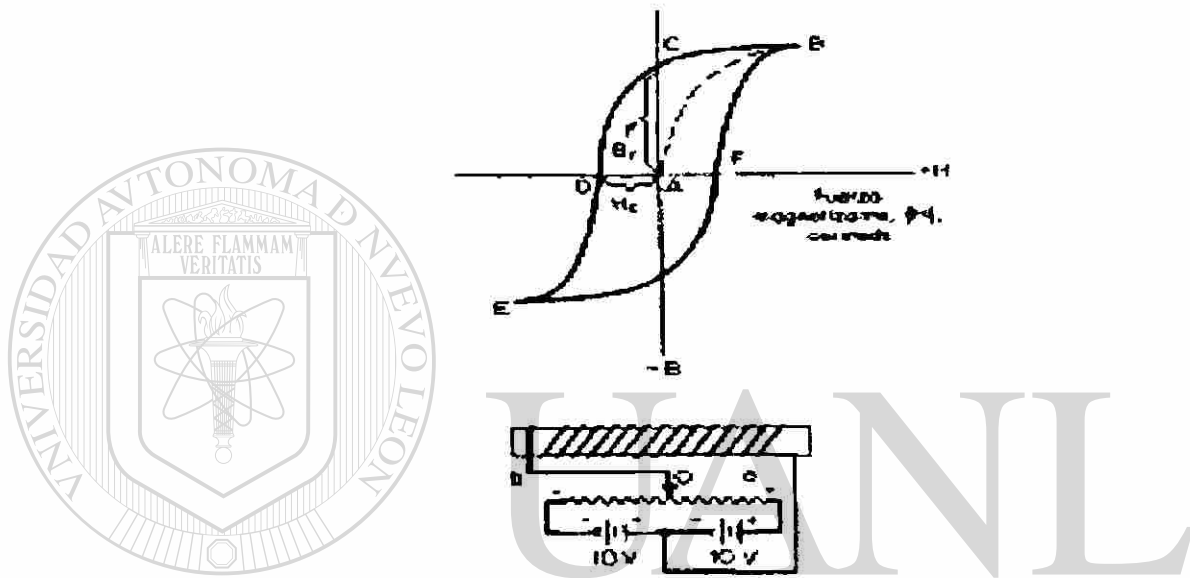
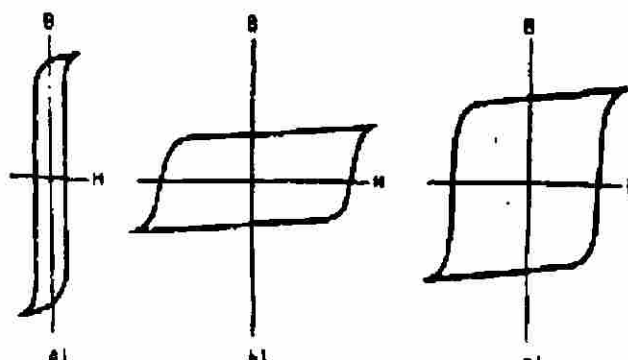


Figura 11. Ilustración de la coercitividad fuerza coercitiva  $H_c$  y magnetismo residual remanencia  $B_r$ .

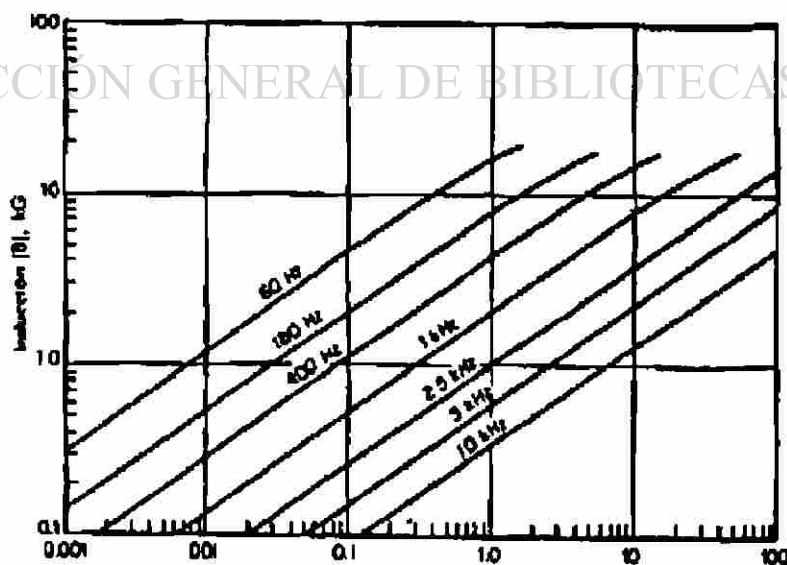
### 3.27 Histeresis

La trayectoria cerrada por las curvas de la figura 12 se conoce como lazo de histeresis, y el área que encierra este lazo es una medida de la energía utilizada en revertir las moléculas magnéticas del núcleo. A la energía que se pierde se le llama pérdida por histeresis. La pérdida por histeresis es de importancia sólo cuando el material del núcleo está sujeto a campos por pulsos de cc o de ca. Ya que el lazo de histeresis se repite una y otra vez para cada ciclo, las pérdidas del núcleo llegan a ser mayores cuando la frecuencia aumenta. Por esta razón, los materiales utilizados para el núcleo de transformadores deberán tener un lazo de histeresis muy estrecho. En la fig. 12 se muestran algunos lazos comunes de histeresis.



**Figura 12.** Lazos típicos de histéresis a) Material típico de núcleo magnético; se requiere una pequeña fuerza coercitiva  $H_c$ , para eliminar grandes magnetismos residuales  $B_r$ , b) Clase típica de materiales de imanes permanentes; se requiere una gran fuerza coercitiva para eliminar el pequeño magnetismo residual c) Otra clase típica de material de imán permanente; se requiere gran fuerza coercitiva para eliminar el gran magnetismo residual  $B_r$ .

La información correspondiente a las pérdidas en el núcleo se puede obtener en forma tabulada o gráfica de los fabricantes de los materiales del núcleo utilizados en un transformador. Un ejemplo de la información en forma gráfica de las pérdidas en un núcleo se muestra en la figura 24, que proporciona la pérdida total en el núcleo (la pérdida por histéresis mas la pérdida por corriente parásita), a diferentes frecuencias que van hasta los 10kHz y diferentes valores de inducción que van hasta 18Kgauss.



**Figura 13.** Las curvas de diseño muestran el máximo de las pérdidas en el núcleo para los núcleos C de Silatron de 4 mils, tipo AH. La garantía de pérdidas en el núcleo es de 10 W/libra máximo para 400 Hz, 15 Kg.

### 3.28 Corrientes Parásitas

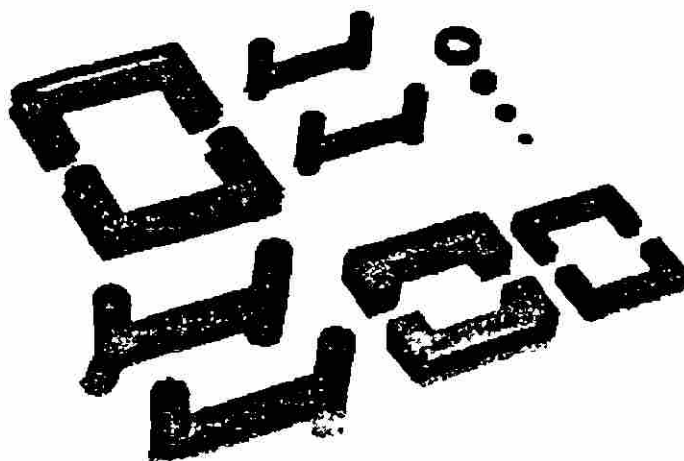
Las corrientes establecidas en los materiales de núcleos magnéticos, debido a los voltajes inducidos originados por la variación de los campos magnéticos, se conocen como corrientes parásitas. La energía perdida en forma de calor, como resultado de la circulación de la corriente parásita en el material del núcleo, se define como la pérdida de la corriente parásita. Ya que esta es proporcional al cuadrado de la frecuencia inducida, llega a ser de una magnitud bastante apreciable cuando se incrementa la frecuencia.

Las corrientes parásitas se pueden reducir al apilar laminaciones en el núcleo, de tal forma que estén en paralelo con el flujo. La oxidación natural de las superficies laminadas también ayuda en gran parte en la reducción de estas corrientes, las laminaciones pueden recubrirse también con una capa delgada de barniz aislante. Pero aún con los núcleos laminados, existe todavía alguna circulación de estas corrientes en las laminaciones individuales. Por lo tanto, a radiofrecuencias, se utilizan ampliamente los materiales de núcleos de polvo de hierro. Cuando la frecuencia sigue aumentando, incluso los núcleos de polvo de hierro no logran ser lo suficiente eficaces para reducir estas pérdidas a un valor apropiado. Entonces se deberán utilizar los núcleos de materiales de ferrita. Las ferritas, a diferencia del hierro o del acero, no son conductores eléctricos.

### 3.29 Núcleos de Polvo de Hierro

Los núcleos de polvo de hierro para bobinas de radio aparecieron por primera vez en el mercado hacia 1930, cuando se utilizaron en transformadores del f-i. Desde ese tiempo hasta la fecha se ha incrementado la demanda de núcleos de polvo de hierro, y también se ha notado una gran mejoría en las técnicas de producción.

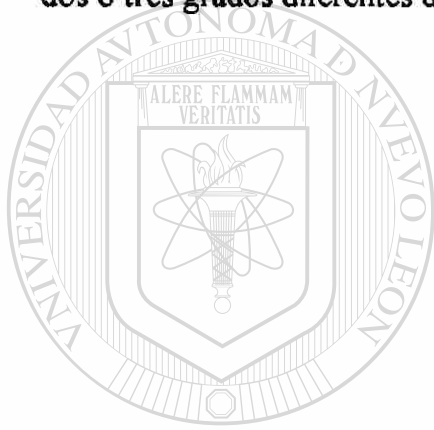
Los núcleos de polvo de hierro se encuentran hoy disponibles para amplia variedad de ampliaciones, y para utilizarse en frecuencias tan altas como 250 MHz. Los receptores de televisión contienen varias bobinas con núcleos de polvo de hierro Fig. 15. Algunos de estos pueden ser de sintonía fija, pero otros pueden ser de sintonía de núcleo móvil, como las bobinas de control de frecuencia horizontal y control de ancho horizontal.



**Figura 15.** Núcleos de polvo de hierro (ferrita) para transformadores de salida horizontal de televisión, y algunos núcleos angulares para bobinas.

El polvo de hierro, utilizado para estos núcleos , se somete primero a un proceso químico que cubre cada una de las diminutas partículas de hierro con una capa aislante. Después se utiliza un aglutinante para agrupar todas las partículas de hierro sumadas a una capa de aislante adicional, sobre la capa de aislante formada por el proceso químico. De esta manera, en el terminado del núcleo las diminutas partículas individuales de hierro son eficazmente aisladas unas de otras, como resultado de esto, la corriente parásitas no puede circular en el núcleo. Todavía habrá una perdida por esta corriente, pero las partículas individuales de hierro son conductores eléctricos y no aisladores y las corrientes parásitas todavía pueden circular en el interior de cada una de las partículas individuales.

La finura de las partículas individuales de hierro, y la cantidad de aglutinante utilizado en proporción con la cantidad de polvo de hierro, serán distintos para diferentes aplicaciones y escalas de frecuencia. El polvo de hierro puede también estar constituido por dos o tres grados diferentes de hierro, mezclado en varias proporciones.



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 4. TRANSFORMADORES

### 4.1 Introducción

Una maquina eléctrica es básicamente un convertidor de potencia que funciona transformando energía de campo magnético en energía de campo eléctrico y viceversa. Las maquinas rotatorias son convertidores dinámicos de potencia (es decir, entra también en juego la energía mecánica). Las maquinas que convierten energía mecánica en energía eléctrica se denominan Generadores, las que convierten energía eléctrica en energía mecánica se denominan Motores, y hay maquinas que convierten energía eléctrica en energía eléctrica, como los Convertidores Rotatorios o los Transformadores.

### 4.2 Transformadores

Las maquinas eléctricas que se utilizan en la actualidad con el fin de convertir potencia siguen el esquema elemental:

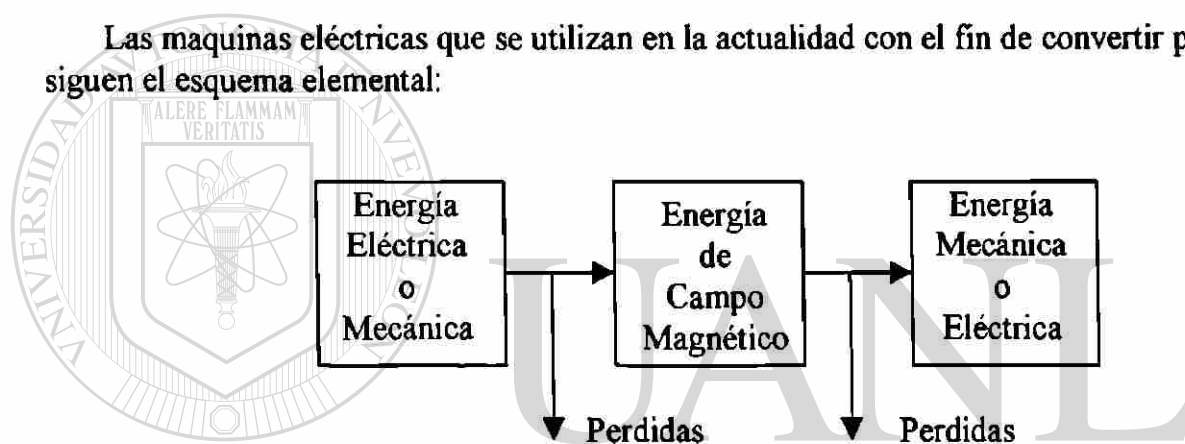


Figura 16. Diagrama a bloques del esquema elemental de las Maquinas Eléctricas.

Existen maquinas que transforman directamente la energía mecánica en energía eléctrica, como la maquina electrostática de Whimshurst o el generador de Van der Graaf. Su principio de funcionamiento se comprende fácilmente del hecho de que al frotar dos materiales entre si, se desprenderán cargas eléctricas de signo opuestos, las cuales pueden ser recogidas por colectores y acumuladas en condensadores. Estas maquinas son impracticadas para funcionar como convertidores de potencia (poca eficiencia, gran volumen, etc. ) y su aplicación principal esta en la investigación científica.

El estudio del transformador constituye una base para el estudio de las maquinas eléctricas de corriente alterna, ya que se demostrara mas adelante que la mayoría de las maquinas de corriente alterna pueden considerarse como consistentes únicamente en dos circuitos eléctricos acoplados magnéticamente, cuya base es, entonces, el transformador monofasico.

El Instituto Americano de Ingenieros Electricistas da la siguiente definición para un transformador: “ Un transformador es un dispositivo eléctrico, sin partes en movimiento continuamente, que por inducción electromagnética transforma la energía eléctrica de uno a mas circuitos a la misma frecuencia, generalmente con valores cambiados de tensión y corriente “.

Su función es cambiar las magnitudes de voltaje y corriente de lado primario al lado secundario

Se enfocara este estudio al transformador de potencia de baja frecuencia, ya que las maquinas eléctricas de corriente alterna, se construyen generalmente para bajas frecuencias. La siguiente figura ilustra la función principal de un transformador.

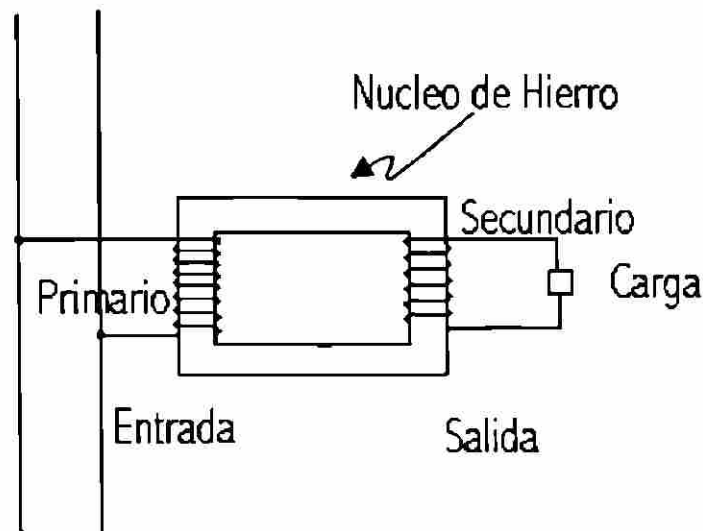


Figura 17. Conexión Básica de un Transformador

#### Eficiencia.

Su principal característica es que su eficiencia es muy alta y es casi la unidad

$$\eta = \text{eficiencia} = P_{\text{salida}} / P_{\text{entrada}}$$

$$\eta = P_{\text{sec}} / P_{\text{primario}}$$

$$\eta > 98\%$$

Dada la alta eficiencia que manifiestan los transformadores, en términos prácticos la potencia que entra al dispositivo es aproximadamente igual a la que sale. Siendo la potencia eléctrica igual al producto del voltaje (diferencia de potencial) por la corriente, entonces un transformador eleva (o disminuye) el voltaje en la misma proporción que disminuye (o eleva) la corriente. Cuando se desea transmitir potencia eléctrica a grandes distancias se trata de manejar siempre voltajes muy altos (del orden de 400,000 V) para disminuir la magnitud de la corriente y, por ende, las pérdidas por efecto Joule ( $P = I^2 R$ ) a través de una línea de transmisión dada.

#### Transformador de distribución.

Es aquel transformador que tiene una capacidad hasta de 500 KVA; hasta 67,000 volts en alta tensión y hasta 15,000 volts en baja tensión.

La presente norma se aplica a transformador de distribución. También se aplica a los autotransformadores incluidos en los límites de capacidad y tensiones aplicadas en el inciso 1, pero considerando su capacidad equivalente como transformador.



### 4.3 Condiciones Generales De Servicio

#### Frecuencia.

La frecuencia de operación debe de ser de 60 Hertz.

#### Temperatura ambiente.

Los transformadores sujetos a estas normas, deben ser apropiados para operar a su capacidad nominal, siempre que a temperatura del ambiente no exceda de 40°C y la temperatura promedio del ambiente durante cualquier periodo de 24 horas no exceda de 30°C (se recomienda que la temperatura promedio del aire refrigerante se calcule promediando las lecturas obtenidas durante 24 horas, ejecutando estas lecturas cada hora. Cuando el ambiente sea el medio refrigerante, se puede usar el promedio de la temperatura máxima y mínima durante el día, por lo general, el valor obtenido en esta forma es ligeramente mayor que el promedio real diario, pero no más de 25°C).

#### Altitud de operación.

Los transformadores de distribución, deben de estar diseñados para una altitud mínima de 1000 metros sobre el nivel del mar.

#### Efecto de la altitud en la elevación de la temperatura.

El aumento de la altitud produce disminución en la densidad del aire, lo cual a su vez incrementa la elevación de la temperatura en los transformadores que dependen del aire para su disipación del calor.

#### Efecto de la altitud en la rigidez dialéctica del aire.

El aumento en la altitud produce disminución en la densidad del aire, lo cual a su vez disminuye la tensión del flameo. La rigidez dialéctica de algunas partes de un transformador, que depende total o parcialmente del aire para su aislamiento, disminuye conforme la altitud, aumenta. Para una clase de aislamiento, dada la rigidez dialéctica a 100 metros de altitud, debe multiplicarse por el factor de corrección apropiado para la nueva altitud a fin de obtener la nueva rigidez dialéctica a la altitud especificada.

La altitud de 4500 metros es considerada la máxima para transformadores normales.

#### Operaciones a tensiones superiores a la nominal

Los transformadores deben ser capaces de operar:

- Con 5% arriba de la tensión nominal del secundario a capacidad nominal en KVA, sin exceder los límites de sobre-elevación de temperatura. Este requisito se aplica cuando el factor de potencia de la carga es de 80% o mayor.
- Con 10% arriba de la tensión nominal del secundario en vacío, sin exceder los límites de sobre-elevación de temperatura.
- Para cualquier derivación se aplican los mismos requisitos anteriores.

#### Rigidez dialéctica del líquido aislante.

La rigidez dialéctica del líquido aislante nuevo no debe ser menor de 28 KV.

### Condiciones especiales de servicio.

Condiciones de servicio fuera de las indicadas en los párrafos anteriores se deben especificar previamente al fabricante. Ejemplo de algunas de estas condiciones son las siguientes:

- Vapores o atmósferas dañinas, exceso de polvo, polvo abrasivo, mezclas explosivas de polvo o gases, vapor de agua, ambiente salino, humedad excesiva, etc.
- Vibraciones anormales, golpes o cambios de posición.
- Temperatura ambiente excesivamente bajas o altas.
- Condiciones de transporte o almacenaje poco usuales.
- Limitaciones de espacio.
- Otras condiciones de operación, dificultades de mantenimiento, tensión desbalanceada, forma de onda deficiente, necesidades especiales de aislamiento, etc.

### 4.4 Clasificación.

Los transformadores se clasifican por su condición de servicio en:

- Para uso interior.
- Para uso exterior.

Los transformadores se clasifican por su sistema de disipación de calor como sigue:

- a) Transformadores secos, enfriados por aire.
  - Auto-enfriado (Clase AA).
  - Enfriados por aire forzado (Clase AFA).
  - Auto-enfriados/enfriados por aire forzado (Clase AA/FA).
- b) Transformadores sumergidos en líquidos aislantes enfriados por aire.
  - Auto-enfriados (Clase OA).
  - Auto-enfriados/enfriados por aire forzado (Clase OA/FA).

Los transformadores se clasifican por su lugar de instalación como sigue:

- Para instalarse en postes, (Tipo Poste).
- Para instalarse en subestaciones (Tipo Subestacion).

### 4.5 Especificaciones Eléctricas.

#### Capacidad nominal en KVA.

La capacidad nominal de un transformador es la capacidad que el devanado secundario del mismo debe suministrar en un tiempo especificado (continuo o limitado) a su tensión y frecuencias nominales, sin exceder los límites de temperatura correspondencia dentro de las condiciones establecidas en esta forma.

#### Capacidades Nominales Preferentes En Kva De Transformadores Monofasicos

5, 10, 15, 25, 37.5, 50,75, 100, 167, 250, 333, 500

#### Capacidades Nominales Preferentes En Kva De Transformadores Trifasicos

15, 20, 45, 75, 112.5, 150, 225, 300, 500

### Especificaciones de nivel de ruido.

Los transformadores deben de estar contruidos para que el promedio del nivel de ruido no exceda los decibeles especificados en la siguiente tabla cuando el transformador sea excitado a tensión nominal, sin carga y sea medido en las condiciones indicadas en el método de prueba.

Los valores en decibeles indicados en la tabla corresponden a los KVA nominales equivalentes a un transformador de dos devanados con la elevación de temperatura permitida por esta norma, para cualquier frecuencia hasta 60 Hertz.

Equivalentes a dos devanados, KVA	Nivel de ruidos en decibeles			
	Tipo			
	AA	AFA	OA	FA
Hasta 300 -----	66	70	56	60
301 a 500 -----	68	71	58	61

Tabla 2. Valores de nivel de ruido de transformadores

### Polaridad de los transformadores monofasicos.

Todos los transformadores monofasicos son de polaridad substractiva.

### Desplazamiento angular de transformadores trifasicos.

El desplazamiento angular entre las tensiones de alta y baja tensión, en transformadores con conexiones Delta-Delta o Estrella-Estrella, es de  $0^\circ$  como se muestra en los diagramas (a) y (b) de la figura 18. El desplazamiento angular entre las tensiones de alta y baja tensión, en transformadores con conexiones Estrella-Delta o Delta-Estrella, es de  $30^\circ$  con la baja tensión atrasada respecto a la alta tensión, como se muestra en los diagramas (c) y (d), de la figura.

La secuencia de fases es el orden 1, 2, 3 y con el sentido indicado de la figura.

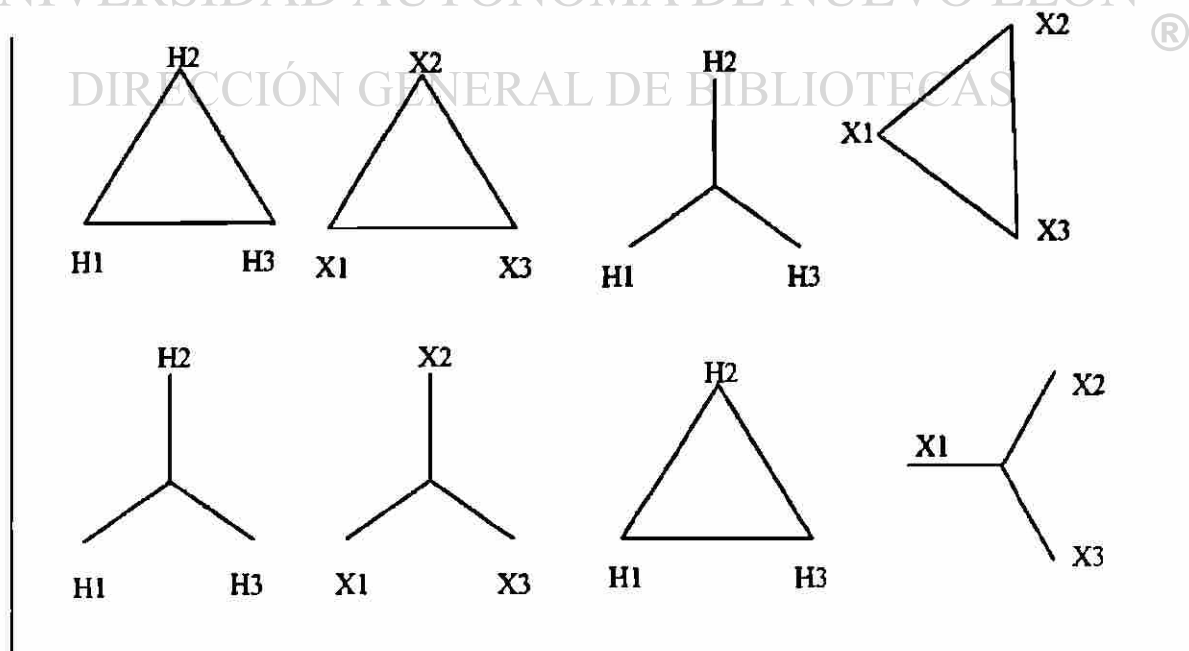
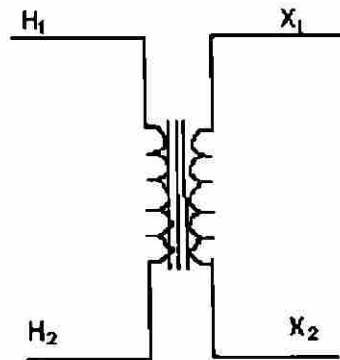


Figura 18 Desplazamiento angular entre alta y baja tensión en transformadores

## 4.6 Designación De Terminales

Los devanados de un transformador se distinguen uno del otro como sigue:  
En los transformadores de dos devanados, el de alta tensión se designa con la letra H y el de baja y tensión con la letra X.

Terminales de Alto y bajo Voltaje



H<sub>1</sub> y H<sub>2</sub> = terminales de alto voltaje  
X<sub>1</sub> y X<sub>2</sub> = terminales de bajo voltaje

Figura 19. Terminales de "Alta" y de "Baja" de un transformador

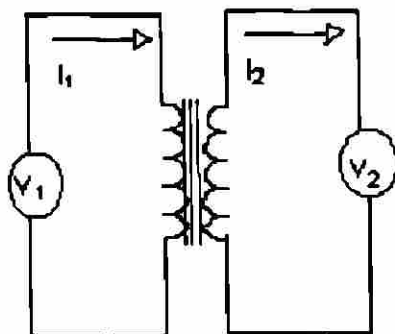
En los transformadores de dos de mas devanados, estos se designan con las letras H, X, Y, Z. La secuencia de esta designación se determina como sigue:

El devanado de tensión mas alta se designa con la letra H y los demás devanados con las letras X, Y Z en orden decreciente de las tensiones.

En el caso de que dos o más devanados tengan la misma tensión pero diferente capacidad en Kva, se asignan las letras en orden decreciente según la capacidad.

## 4.7 Relación de transformación

Es la capacidad que presenta el transformador en variar el voltaje y la corriente del primario al secundario.



$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$a$  = relación de transformación

$N_1$  = numero de vueltas de la bobina del primario

$N_2$  = numero de vueltas de la bobina del secundario

$I_1$  = corriente del primario

$I_2$  = corriente del secundario

Figura 20. Relación de transformación

## 4.8 Bancos Estrella-Delta

Si el neutro del lado de alta tensión del banco de transformador se conecta al neutro del sistema, el banco puede quemarse por las siguientes razones:

- Se producirán corrientes circulantes en Delta que tratan de equilibrar cualquier carga desequilibrada conectada a la línea de primario.
- Actuara como un banco de puesta a tierra y suministra corriente de cortocircuito a cualquier cortocircuito en el sistema en el cual esta conectado.
- El devanado en Delta forma un circuito cerrado por el que circularan las corrientes de la tercera armónica.
- Puede sobrecargarse si se quema un fusible en caso de cortocircuitos a tierra, dejando el banco con la capacidad de un banco conectado en Estrella abierta Delta abierta.

El resultado de todos estos efectos es que el banco se ve forzado a conducir corrientes adicionales a su corriente normal de carga. La suma de las corrientes es, en muchas ocasiones, suficientes para quemar el banco.

Cuando se utilizan conexiones en Estrella-Delta y el neutro del lado de alta tensión del transformador no se conecta al neutro del circuito, un conductor desconectado en el circuito, del primer trefilar convierte el banco en un conjunto con entrada y salida monofasicas. Si el banco alimenta circuitos de motores, se producirán sobrecorrientes peligrosas en cada uno de los circuitos de, motores trifasicos. La corriente que pasa por los dos de los conductores del circuito alimentador de motores será de igual magnitud, mientras que la del tercer conductor será igual a la suma de dichas corrientes.

## 4.9 Bancos Delta-Delta

Para poder tener cargas equilibradas en los transformadores, todas las unidades deben:

- Estar conectadas en la misma posición de las derivaciones.
- Tener la misma relación de tensión.
- Tener la misma impedancia.

Un banco de tres transformadores puede hacerse funcionar a potencia reducida con una pequeña carga desequilibrada, si dos de las unidades tienen la misma impedancia y la tercera unidad tiene una impedancia comprendida entre  $\pm 25\%$  de las unidades iguales. En la tabla siguiente se indica la distribución de la carga según la relación de desequilibrio ( $Z_1$  = impedancia de la unidad distinta, y  $Z_2$  = impedancia de las unidades iguales).

Relación $Z_1 / Z_2$	Porcentaje de carga* en	
	Unidad distinta	Unidades Iguales
0.75	109.0	96.0
0.8	107.0	96.5
0.85	105.2	97.3
0.9	103.3	98.3
1.1	96.7	102.0
1.15	95.2	102.2
1.2	93.8	103.1
1.25	92.3	103.9

**Tabla 3.** Porcentajes de carga en un transformador dependiendo de la relación  $Z_1$  en  $Z_2$

Con cargas desequilibradas, debe compararse que ningún transformador quede sobrecargado.

#### 4.10 Protección De Motores.

Referente bancos conectados en Estrella-Delta-Estrella, con neutro aislado. Por lo general, la protección contra sobrecargas utilizada en los circuitos de alimentación de motores, consiste en un dispositivo de protección en solo dos de los tres conductores. Si se desconecta un conductor del circuito de alimentación del primario, pueden producirse tensiones anormalmente elevadas, lo cual puede desequilibrar notablemente la corriente en el circuito del motor. Si ocurriera que la corriente mas alta de las tres es la que pasa por el conductor sin proteger, las posibilidades de que el motor se quemara aumentarían considerablemente. El instalar un tercer dispositivo de protección contra sobrecargas en cada uno de los conductores de alimentación de motores, elimina la posibilidad de averías del motor por esta razón. El hecho de utilizar tres dispositivos de protección se justifica por la posibilidad existente de que se abra una línea del primario del transformador. Tal posibilidad queda afectada por el tipo y disposición de los dispositivos de protección y de maniobra utilizados en esa parte del sistema.

#### Sobrecargas momentáneas

Las siguientes recomendaciones de carga, pueden utilizarse para estos transformadores provistos de modernos sistemas de aislamiento térmico.

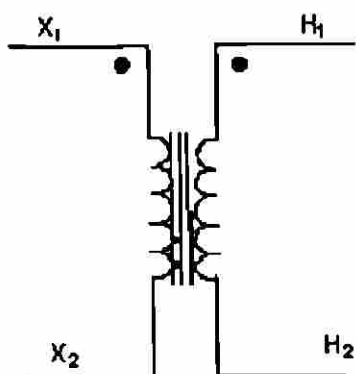
Transformadores en baño de aceite, enfriados por ventilación natural, temperatura del aire ambiente 30°C (según las normas ASA, suplemento C57 9206 200).

Duración	Veces la corriente nominal
2 segundos	25.0
10 segundos	11.3
30 segundos	6.7
60 segundos	4.75
5 minutos	3.0
30 minutos	2.0

**Tabla 4.** Tiempos de sobrecargas permitidos en transformadores

### 4.11 Análisis De Los Transformadores

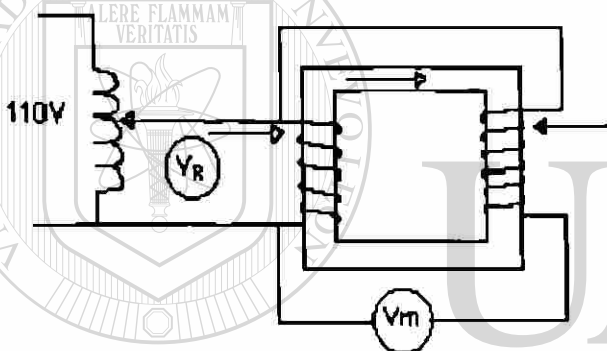
#### Polaridad de el transformador



Los subíndices indican la Polaridad de las maquinas y como se deberá conectar en paralelo  
 Los puntos indican que la corriente entra en el lado X<sub>1</sub> y sale en el lado H<sub>1</sub>

Figura 21. Terminales indicando la polaridad de un transformador

#### Prueba de polaridad a un transformador



Se puentea una terminal de alta y otra de baja

$$\phi = \phi_1 + \phi_2$$

$$V_m > V_R$$

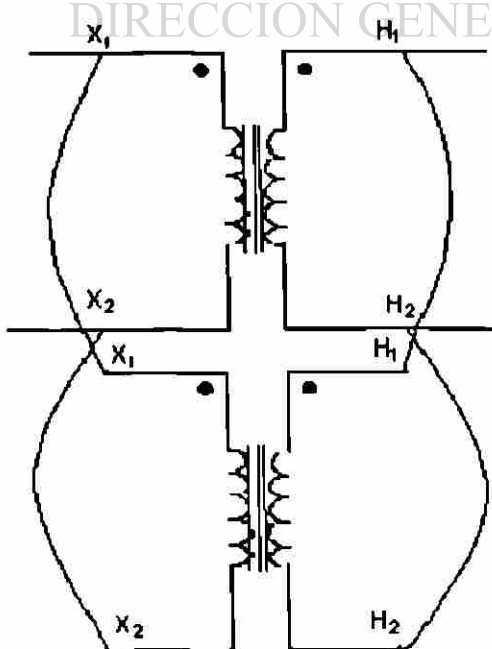
X y H tienen diferente polaridad

$$V_m < V_R$$

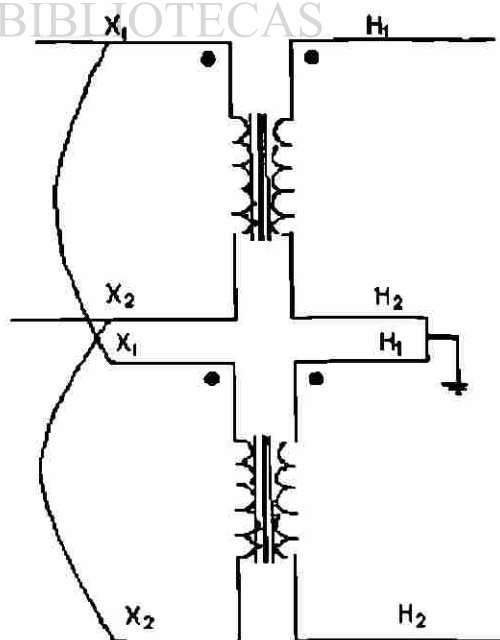
H y X tiene la misma polaridad

Figura 22. Prueba de polaridad de un transformador

#### Conexiones serie y paralelo



Paralelo // paralelo



Paralelo // serie

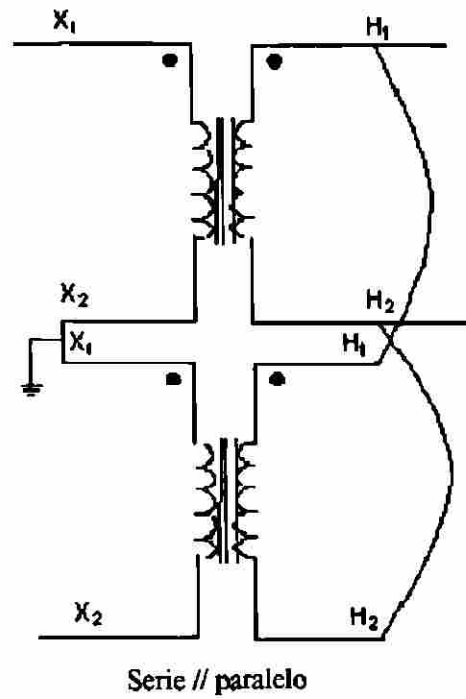


Figura 23 Conexiones serie - paralelo de un transformador

Métodos para el análisis de un transformador

- ✓ Mediante pruebas de laboratorio
- ✓ Analizarlo mediante el método de circuito equivalente de parámetros.

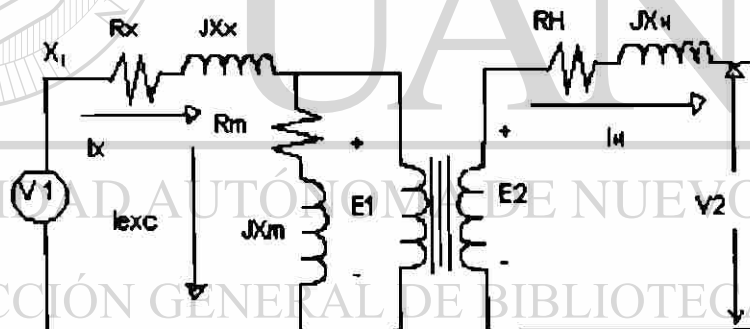


Figura 24. Modelo de 6 parámetros, el lado de baja tensión como primario.

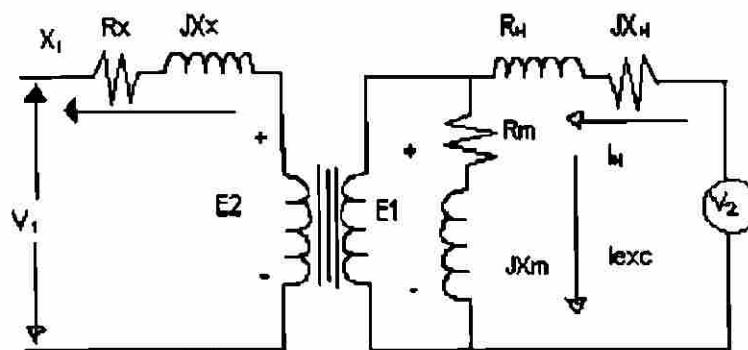
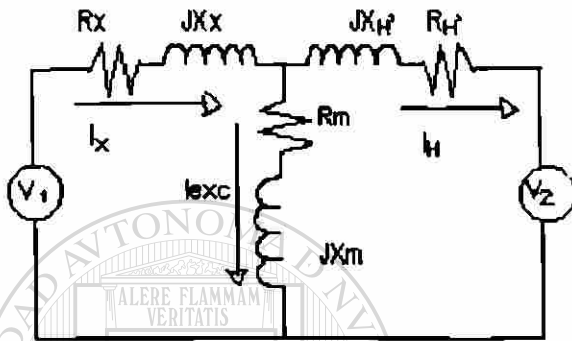


Figura 25. Modelo de 6 parámetros tomando el lado de alta tensión como primario.

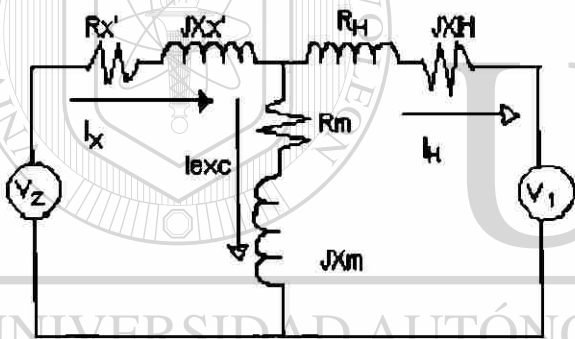


Parámetros

$E_1$ y $E_2$	Voltaje Inducidos Internos
$V_1$ y $V_2$	Voltaje en terminales (externos)
$R_m + jX_m$	Rama de excitación (solo en los lados primarios)
$R_x$	resistencia del devanado de baja tensión
$R_H$	resistencia del devanado de alta tensión
$jX_x$	Reactancia de disipación del devanado de baja tensión
$jX_h$	Reactancia de disipación del devanado de alta tensión.
$I_x$	Corriente de baja.
$I_H$	Corriente de alta.
$I_{exc}$	corriente de excitación.



Circuito Reflejado al lado de baja tensión



Circuito Reflejado al lado de alta tensión

Figura 26. Reflexión de impedancias en un transformador

4.12 Obtención de los 6 parámetros del transformador realizando 2 pruebas.

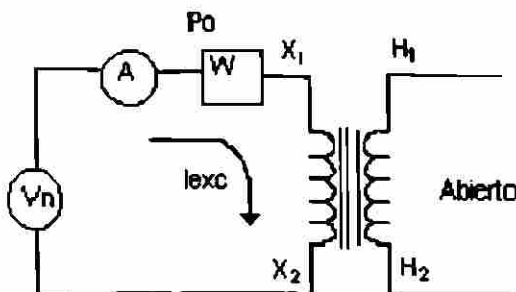
- a) Prueba de Vacío (para determinar  $R_m$  y  $X_m$ )
- b) Prueba de Corto circuito (para determinar  $R_x$ ,  $X_x$ ,  $R_H$  y  $X_H$ )

Prueba de vacío

Se recomienda que se alimente el lado de baja tensión.

Condiciones de la prueba.

1. aplicar el voltaje nominal
2. el secundario abierto (sin carga).



$P_o$  = Potencia de vacío  
 $I_{exc}$  = Corriente de Excitación  
 $V_n$  = Voltaje Nominal

$$R_m = (P_o / I_{exc}^2) - R_x$$

$$X_m = X_T - X_x$$

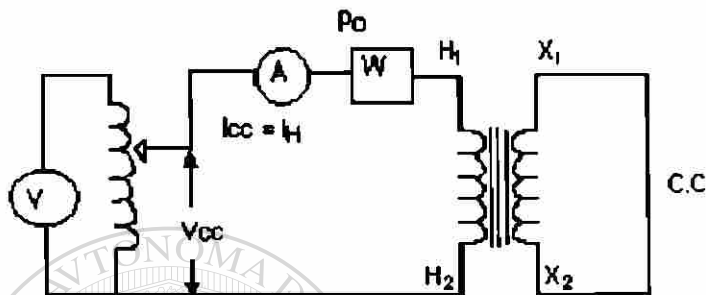
$$X_T = \sqrt{(V_m / I_{exc})^2 - (R_x + R_m)^2}$$

Prueba de Cortocircuito.

Se recomienda que se alimente el lado de alta tensión.

Condiciones de la prueba.

1. Cortocircuito en el secundario.
2. Aplicar un voltaje bajo al lado que se alimenta para que el transformador tome la corriente nominal de ese lado.



$V_{cc}$  = Voltaje de CC  
 $P_{cc}$  = Potencia de CC  
 $I_{cc}$  = Corriente de CC = I nominal.

$$R_H = R_{X'} \quad R_H + R_{X'} = P_{cc} / I_{cc}^2$$

$$X_T = X_H + X_{X'} \quad X_H = X_{X'}$$

$$X_T = \sqrt{(V_{cc} / I_{cc})^2 - (R_H + R_{X'})^2}$$

#### 4.13 Transformadores Trifasicos.

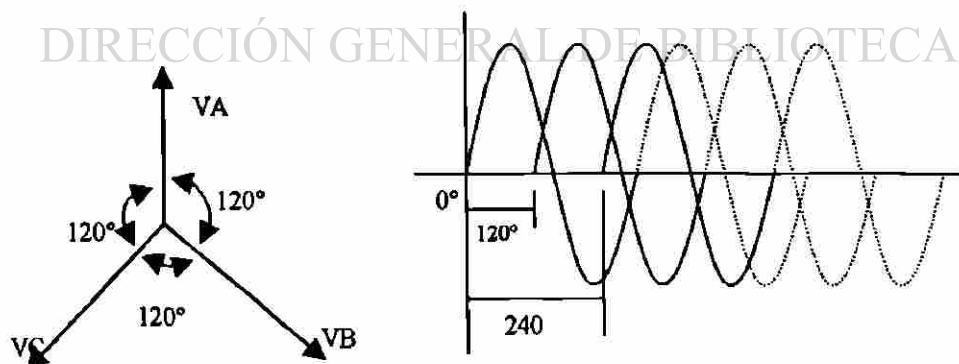
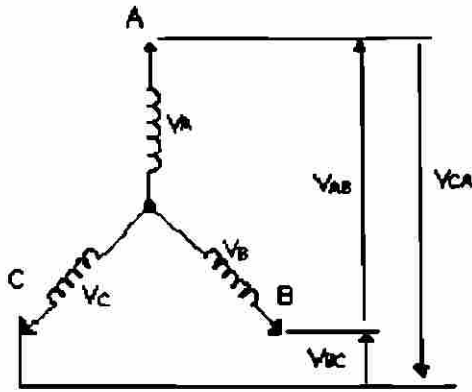


Figura 27. Forma de onda del voltaje trifasico

Conexiones de los transformadores.



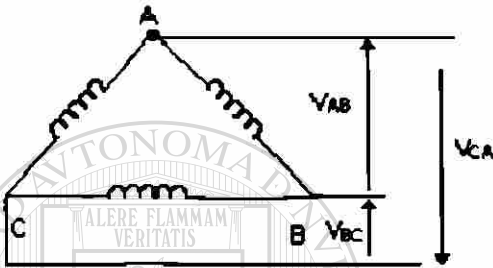
$V_{AB}, V_{BC}, V_{CA}$  = Voltaje de línea

$V_A, V_B, V_C$  = Voltaje de fase

$$V_L = \sqrt{3} V_f$$

$$I_L = I_f$$

a) Estrella



$V_A = V_B = V_C = V_{AB} = V_{BC} = V_{CA}$

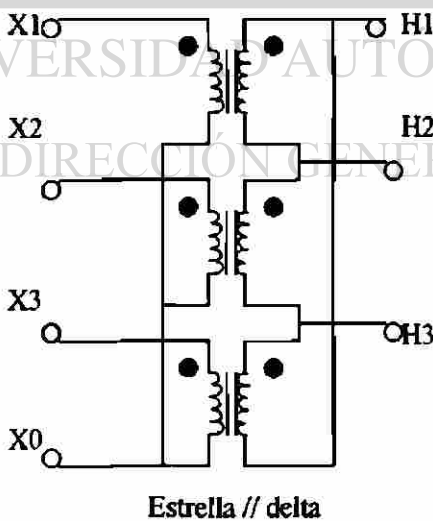
$$I_L = \sqrt{3} I_f$$

$$V_L = V_f$$

b) Delta.

Figura 28. Conexiones delta-estrella de un transformador

4.14 Conexiones entre transformadores monofasicos para formar transformadores trifasicos.



Estrella // delta

Baia	Alta

Figura 29 Conexión de tres transformadores monofasicos para formar uno trifasico.

Transformador de Distribución (delta abierto) comercial

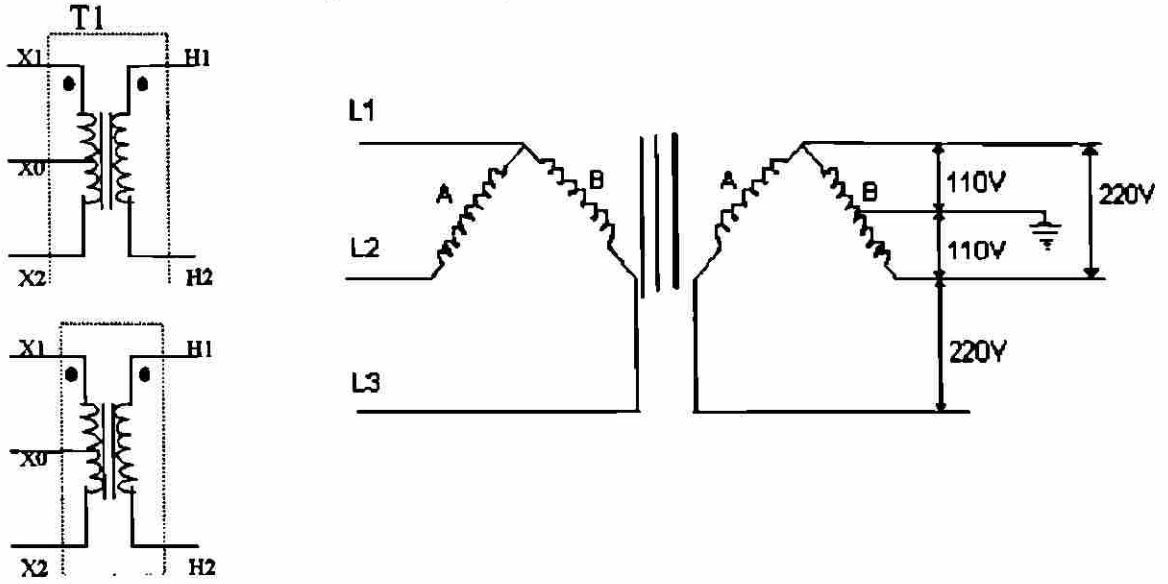


Figura 30 Transformador de distribución comercial delta-abierto

4.15 Regulación de Voltaje

La regulación de voltaje significa que tanto cae el voltaje desde el vacío a la plena carga.

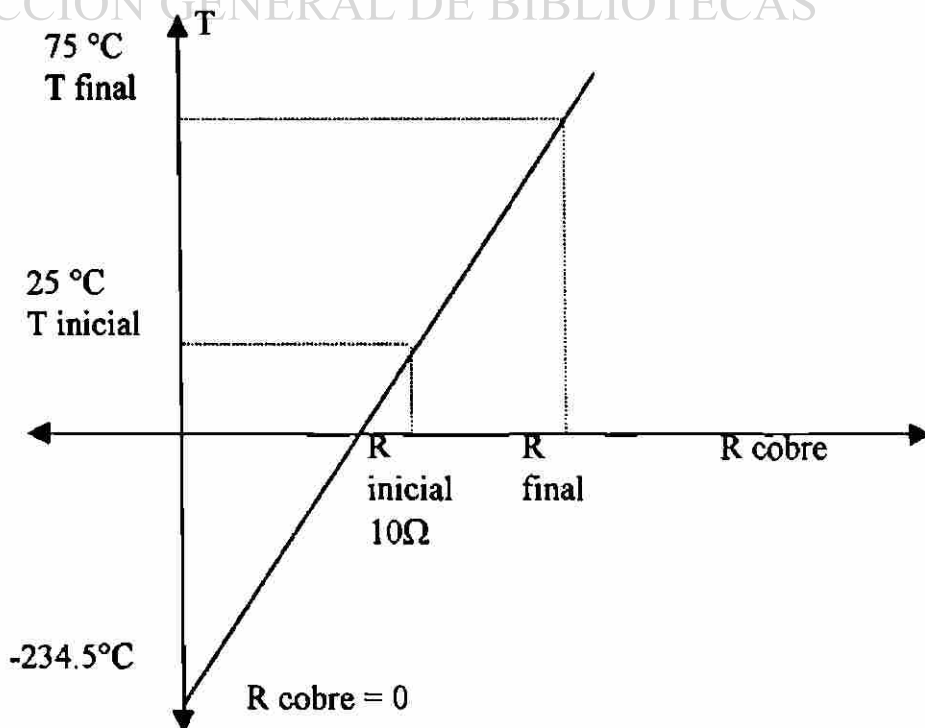
$$\text{Regulación} = \% \text{Reg}$$

$$\% \text{Reg} = (V_o - V_n / V_n) \times 100$$

$V_o$  = Voltaje de Vacío     $V_n$  = Voltaje bajo Carga.

4.16 Corrección de Resistencia por Temperatura.

Ejemplo:  $R = 10 \Omega$  a  $25^\circ$   
 $R = ?$  a  $75^\circ$



$$\frac{T_{\text{inicial}} + 234.5^{\circ}\text{C}}{R_{\text{inicial}}} = \frac{T_{\text{final}} + 234.5^{\circ}\text{C}}{R_{\text{final}}}$$

$$R_{\text{final}} = \left( \frac{T_{\text{final}} + 234.5^{\circ}\text{C}}{T_{\text{inicial}} + 234.5^{\circ}\text{C}} \right) R_{\text{inicial}}$$

$$R_{\text{final}} = \left( \frac{75^{\circ}\text{C} + 234.5^{\circ}\text{C}}{25^{\circ}\text{C} + 234.5^{\circ}\text{C}} \right) 10 \Omega$$

$$R_{\text{final}} = 11.92 \Omega$$

#### 4.17 Fabricación De Transformadores Comerciales

Los transformadores TUSA son producidos en un amplio parque industrial, equipado con la maquinaria mas avanzada e instrumentos de extrema precisión. Por eso, desde la fabricación los ensayos y el riguroso control de calidad en la recepción de los materiales hasta las pruebas finales, dan garantías de productos eficientes con calidad a la altura del nombre Siemens.

##### Transformadores normalizados

Son transformadores para instalación en redes aéreas de distribución de energía eléctrica, con niveles de aislamiento de clase tensión 15 y 25 kv., en aceite mineral aislante, refrigerados naturalmente, adecuados para montaje en poste.

##### Características básicas

Norma genérica

NOM-J-116-1989

##### Ejecución

Tanque sellado

##### Potencias normalizadas Kva

30,45,75,112.5,150,225

##### Frecuencia (Hz)

60

##### Grupo de conexiones

$\Delta$ -Y con neutro fuera del tanque

##### Tensiones primarias(V)

15kV:13860/13530/13200/12870/12540

25kV:24150/23575/23000/22425/21850

## Conmutaciones con el transformador desenergizado

Por conmutador interno accionado a través del registro de mano localizado en la tapa del transformador hasta 150 KVA y accionamiento externo para 225 kVA.

Tensión secundaria (V)  
440/254 ó 220/127

### Núcleo

Construido con lamina de acero al silicio rolada en frío, tipo grano orientado.

### Devanados

Primario: construido con conductores de sección circular, aislados con esmalte reforzado, clase térmica B (130°C).

### Material del tanque

Fabricado con lamina de acero SAE 1010/1020, con los siguientes espesores:

Tapa: 2.65mm.  
Cuerpo: 2.65mm.  
Fondo: 3.0mm.

### Radiadores

Los disipadores de calor son radiadores de tubo de acero con espesor de 1.6mm, soldados al tanque.

### Hermeticidad de las soldaduras

Es probada con cada unidad con liquido penetrante regente a rayos ultravioleta.

### Pintura del tanque

Interna: después de la limpieza mecánica y con solventes de las superficies, se aplica una mano de pintura epoxi-poliamida con pigmentos de oxido de hierro con 30 micras de espesor.

Externa: la superficie son limpiadas con chorros abrasivos al estándar SA 2 ½ de la norma SIS 055900. Como fondo se aplican dos manos de pintura eposi-poliamida, tipo alto espesor con pigmentos de oxido de hierro aplicadas por procesos flooding, con un espesor total de 100 micras. La terminación es hecha con una mano de pintura de poliuretano alifatico, gris claro, pigmento de dióxido de titanio y un espesor de 40 micras.

### Indicación del nivel de aceite

Por medio de una marca indeleble en la pared interna del tanque para transformadores hasta 150 kVA e indicador magnético para los de 225 kVA.

### Registro de mano

Destinado para la inspección visual de la parte superior del transformador, para accionar el conmutador de tensiones y para verificar el nivel de aceite. Esta localizada en la tapa del tanque con empaques y resaltos para evitar la penetración de la humedad.

**Boquillas terminales****Alta Tensión**

Boquilla de porcelana sólida con terminal tipo presilla, para un diámetro de entrada de 13 $\phi$ mm; fijados internamente en la tapa.

**Baja Tensión**

Boquilla de porcelana sólida con terminal tipo presilla para cable de acuerdo a lo indicado de los dibujos de dimensiones, fijado internamente en el tanque.

**Placa de datos**

Confeccionada en placa de aluminio adonizado de 100 x 1300 mm con los datos de identificación del transformador y del esquema de conexiones de devanados y derivaciones.

**Garantía de calidad**

Todos los productos TUSA-Siemens son elaborados dentro del sistema Garantía de Calidad, desacuerdo con los parámetros fijados por la Norma ISO 9000.

**Pruebas de rutina**

Todos los transformadores fabricados son sometidos a las siguientes pruebas:

- Resistencia óhmica de los devanados
- Relación de transformación
- Resistencia del aislamiento
- Desplazamiento angular
- Secuencia de fases
- Pérdidas de excitación
- Pérdidas en carga
- Corriente de excitación (IO)
- Tensión de otro circuito (Z)
- Tensión aplicada al dialéctico
- Tensión inducida

**Pruebas tipo**

Son efectuadas periódicamente, por criterio de muestras para mantener el control total de los procesos productivos, las siguientes pruebas:

- Tensiones de impulso
- Elevación de temperatura
- Factor de potencia de aislamiento
- Ruido
- Radio interferencia

**Pruebas especiales**

Son efectuadas pruebas de resistencia dinámica al corto circuito en los transformadores fabricados como prototipos de nuevas series de productos.

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}}$$

en donde  $R$  = reluctancia combinada y  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$  = reluctancias de las trayectorias separadas.

### 3.21 Curva de Imanación

Debido a que la reluctancia de una sustancia magnética no es constante, sino que varía con los cambios en la densidad de flujo, la permeabilidad de una sustancia magnética también variará con cualquier cambio en la densidad de flujo. La razón de esto es que la reluctancia de un material magnético varía con cualquier cambio en el flujo. Por supuesto, la reluctancia de un cubo de solo 1 cm de ese material, también variará al mismo tiempo. La reluctancia de un cubo de 1 cm de cualquier material es su reluctividad, y la permeabilidad es igual a uno dividido por la *reluctividad*. De esto se obtiene, que la permeabilidad de un material magnético también variará con cualquier cambio en el flujo.

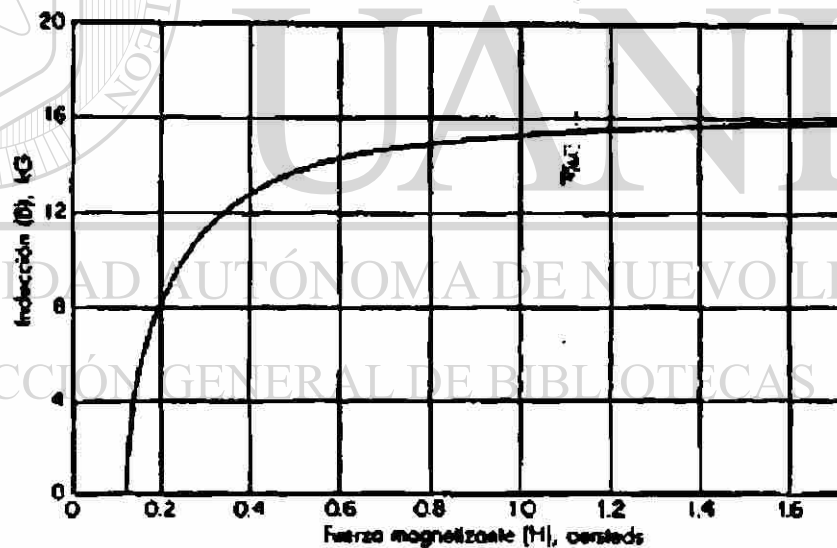


Figura 9. Curva típica de magnetización de cc, de un núcleo de Silectron de 12 mils sin corte y sin impregnar.

Debido a que el cambio en la reluctancia no será directamente proporcional al cambio en el flujo, el cambio en la permeabilidad tampoco será directamente proporcional a cambios en el flujo. Estos hechos deberán ser siempre tomados en consideración cuando se realicen los cálculos de circuitos magnéticos.



Las curvas y las tablas de magnetización que muestran la relación entre  $B$  y  $H$  o entre  $B, H$  y  $\mu$ , en varias etapas de magnetización para diferentes grados de acero y hierro, y varios otros tipos de materiales magnéticos se ponen a la disposición del usuario por parte de los fabricantes de transformadores de acero y otros materiales de núcleo.

Las curvas de magnetización pueden tomar diferentes formas. Algunas pueden ser detalladas en papel lineal común para gráficas, mientras que otras deben ser realizadas en papel logarítmico o semilogarítmico. El empleo de las curvas de magnetización simplifica grandemente la solución de problemas sobre circuitos magnéticos. Las curvas de magnetización típicas se muestran en la figura 9.

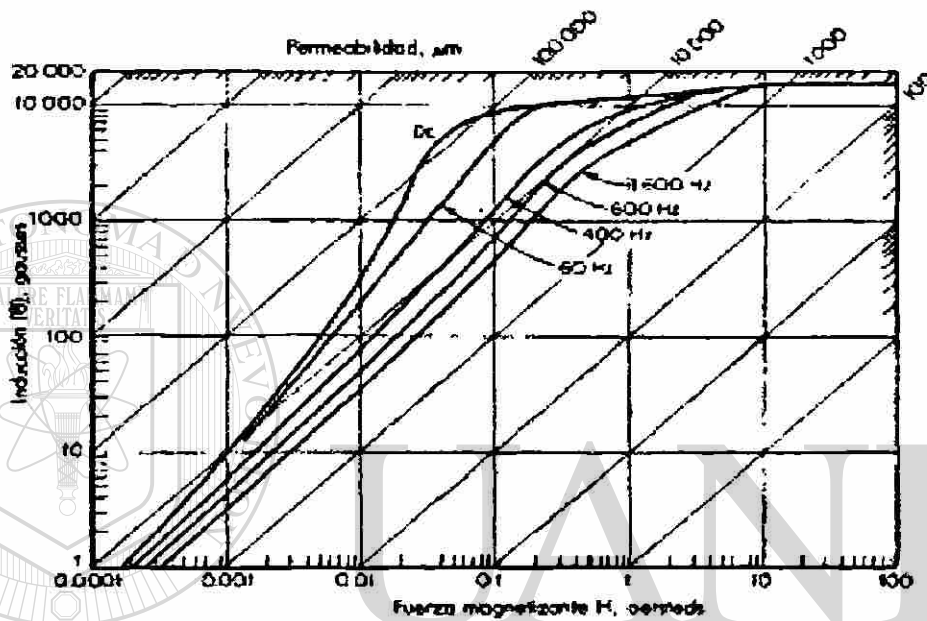


Figura 10. Curvas de magnetización para 0.014 con una inducción y permeabilidad de 4750 contra la fuerza magnetizante: tipo AL 4750, calibre 0.014 in, maestreado de anillos 1.9 por 2.5 in.

### 3.22 Cálculos con Circuitos Magnéticos

La resistencia de un conductor eléctrico es igual a la resistencia específica o resistividad del conductor, multiplicada por su longitud y dividida por su área de sección transversal. De la misma manera la reluctancia de un material magnético (o conductor de flujo o líneas de fuerza) es igual a la reluctancia específica, o reluctividad del material magnético multiplicado por la longitud del material y dividido entre su área de sección transversal. En otras palabras, cuando la longitud de un circuito magnético aumenta la reluctancia aumenta proporcionalmente; pero cuando el área de sección transversal aumenta, disminuye proporcionalmente. Por lo tanto, la reluctancia de un circuito magnético es directamente proporcional a su longitud e inversamente proporcional al área de su sección transversal. y la ecuación para determinar la reluctancia puede escribirse en la forma siguiente:

$$R = \frac{(l/\mu) * L}{A}$$

en donde:  $R$  = reluctancia en unidades  
 $\mu$  = permeabilidad  
 $L$  = longitud del circuito magnético  
 $A$  = área de sección transversal del  
 Circuito magnético

Si  $L$  esta dada en metros.  $A$  estará en metros cuadrados, pero si  $L$  esta dada en centímetros,  $A$  estará en centímetros cuadrados. La división de 1 entre la permeabilidad de una sustancia magnética para obtener su reluctividad es un procedimiento similar al utilizado para obtener la resistividad, o resistencia especifica de un conductor eléctrico al considerar el reciproco de su conductividad.

La ecuación básica fundamental, para determinar el flujo total puede ahora reescribirse como:

$$\phi = \frac{Fmm}{R} = \frac{Fmm}{(L/\mu A)}$$

en donde:  $Fmm$  = Fuerza magnetomotriz en ampere-vueltas  
 $\mu$  = permeabilidad  
 $A$  = area de sección transversal  
 $L$  = longitud

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

### 3.23 Electroimanes

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La potencia de arrastre o fuerza de tracción de un electroimán puede calcularse a partir de una ecuación derivada de la definición fundamental de un polo magnético unitario. Un polo magnético unitario es un polo con una fuerza tal que repelería un polo similar con exactamente la fuerza de una dina cuando la distancia entre los polos es de un centímetro.

La ecuación fundamental del cálculo del electroimán es

$$T = \frac{AB^2}{72134000}$$

en donde:  $T$  = arrastre, libras  
 $A$  = área de sección transversal de  
 De las caras del polo in<sup>2</sup>  
 $B$  = densidad de flujo, lineas/in<sup>2</sup>

### 3.24 Saturación

Se dice que cualquier material magnético está saturado, cuando un mayor aumento en la fuerza magnetizante, o en la intensidad del campo, no puede ya ocasionar un aumento en la densidad de flujo del material. El valor de la densidad de flujo en el material del núcleo de cualquier circuito electromagnético es de considerable importancia; este valor dependerá del uso del material magnético.

Si el núcleo de un transformador en el circuito de placa de la salida de potencia de una válvula llega a saturarse magnéticamente, dará como resultado una distorsión intensa y una transferencia de energía escasa del primario al secundario. Si la corriente de polarización en la cabeza reproductora de una grabadora de cinta es bastante alta o bastante baja, cualquier información reproducida se distorsionará en gran medida. Por otra parte, algunos dispositivos electromagnéticos operarán sólo de manera muy baja, o nula, si la densidad de flujo inicial en el material del núcleo no está a su valor máximo. El punto de saturación de cualquier hierro o acero magnético puede determinarse muy fácilmente a partir de su curva de magnetización  $B-H$ .

### 3.25 Retentividad

Una medida de la retentividad es la cantidad de magnetismo, o valor de  $B$ , que permanece en un material magnético después de que la fuerza magnetizante se ha elevado a un valor más que suficiente para saturar al material y después reducirse a cero; el valor de  $B$  que permanece en el material se llama magnetismo residual o remanente. Si dos imanes permanentes del mismo tamaño, de materiales distintos, son magnetizados hasta saturarlos, el que tenga una característica permanente más fuerte, tendrá por lo tanto, una retentividad más alta. Sin embargo, esto no significa necesariamente que el imán más fuerte será el más difícil de desmagnetizar, ya que esto depende de otros factores además del de retentividad.

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### 3.26 Coercitividad o Fuerza Coercitiva

La coercitividad es el valor de la fuerza magnetizante que se opone y que es necesaria para reducir el magnetismo residual o remanente, en una sustancia magnética, hasta un valor de cero. Un concepto claro de coercitividad puede obtenerse si se estudia la figura 11. Supóngase que el núcleo de hierro de la bobina no está magnetizado, y que el ajuste del potenciómetro está en el punto medio, o cero. Cuando el ajuste del potenciómetro se mueve hacia el punto  $a$ , el material del núcleo llegará a magnetizarse hasta la saturación, a lo largo de la curva de magnetización  $A-B$ . Si después el ajuste del potenciómetro se regresa hacia el centro, o a la posición cero, la densidad de flujo  $B$  en el núcleo no regresará a cero por la línea  $A-B$  de la curva, si no que lo hará a través de la línea  $B-C-D$ , y cuando el ajuste del potenciómetro se encuentre nuevamente en cero, la densidad de flujo todavía estará en el punto  $c$ . Este será el magnetismo residual, o remanencia, indicado por el símbolo  $B_r$ . Para reducir la remanencia a cero, es necesario mover el ajuste del potenciómetro hacia el punto  $b$  para producir una fuerza de magnetización opuesta al campo residual en el núcleo. Esto

ocasionará que el campo residual regrese a cero a lo largo de la línea desde  $C$  a  $D$ . El valor negativo de  $H$  necesario para reducir el magnetismo residual en el núcleo a un valor de cero es la coercitividad del material del núcleo. La coercitividad se representa por el símbolo  $H_c$ .

Si el ajuste del potenciómetro se mueve todavía más hacia la izquierda, de nuevo se magnetizará el núcleo, pero la magnetización será ahora en una dirección negativa.

(Esto se basa en la suposición de que la dirección original era positiva.) Enseguida ocurrirá la saturación en el punto  $E$  de la curva de magnetización. Si el valor negativo de  $H$  es ahora reducido a cero y después incrementado nuevamente a su valor positivo más alto, al mover el ajuste del potenciómetro hacia la derecha, la densidad de flujo en el núcleo, seguirá una nueva línea desde  $E$  hasta  $F$ , o cero, y después subirá de regreso al punto  $B$ .

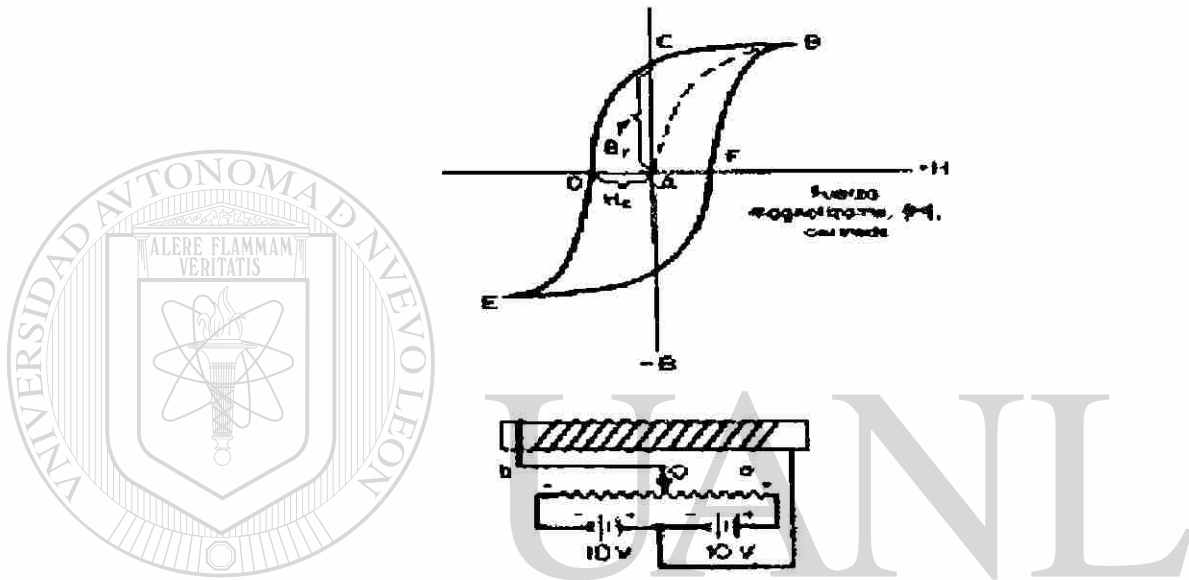
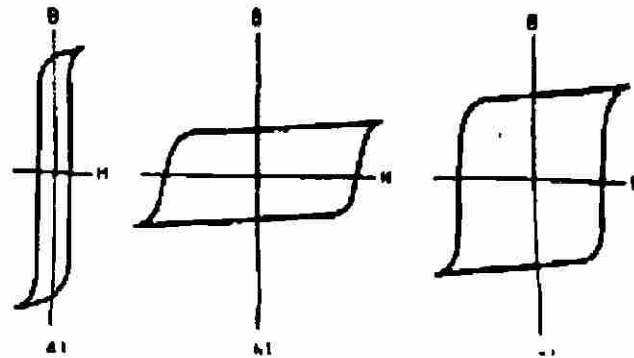


Figura 11. Ilustración de la coercitividad fuerza coercitiva  $H_c$  y magnetismo residual o remanencia  $B_r$ .

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

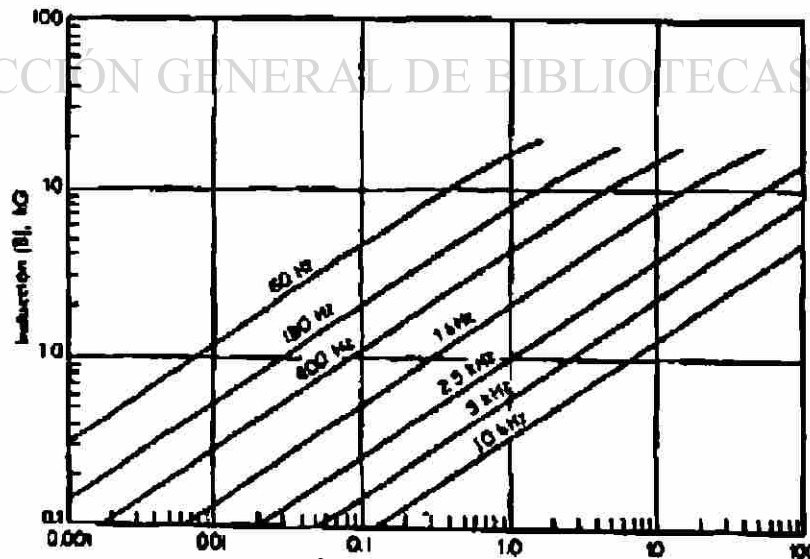
### 3.27 Histeresis

La trayectoria cerrada por las curvas de la figura 12 se conoce como lazo de histéresis, y el área que encierra este lazo es una medida de la energía utilizada en revertir las moléculas magnéticas del núcleo. A la energía que se pierde se le llama pérdida por histéresis. La pérdida por histéresis es de importancia sólo cuando el material del núcleo está sujeto a campos por pulsos de cc o de ca. Ya que el lazo de histéresis se repite una y otra vez para cada ciclo, las pérdidas del núcleo llegan a ser mayores cuando la frecuencia aumenta. Por esta razón, los materiales utilizados para el núcleo de transformadores deberán tener un lazo de histéresis muy estrecho. En la fig. 12 se muestran algunos lazos comunes de histéresis.



**Figura 12.** Lazos típicos de histéresis *a)* Material típico de núcleo magnético; se requiere una pequeña fuerza coercitiva  $H_c$ , para eliminar grandes magnetismos residuales  $B_r$  *b)* Clase típica de materiales de imanes permanentes; se requiere una gran fuerza coercitiva para eliminar el pequeño magnetismo residual *c)* Otra clase típica de material de imán permanente; se requiere gran fuerza coercitiva para eliminar el gran magnetismo residual  $B_r$ .

La información correspondiente a las pérdidas en el núcleo se puede obtener en forma tabulada o gráfica de los fabricantes de los materiales del núcleo utilizados en un transformador. Un ejemplo de la información en forma gráfica de las pérdidas en un núcleo se muestra en la figura 24, que proporciona la pérdida total en el núcleo (la pérdida por histéresis mas la pérdida por corriente parásita), a diferentes frecuencias que van hasta los 10kHz y diferentes valores de inducción que van hasta 18Kgauss.



**Figura 13.** Las curvas de diseño muestran el máximo de las pérdidas en el núcleo para los núcleos C de Silectron de 4 mils, tipo AH. La garantía de pérdidas en el núcleo es de 10 W/libra máximo para 400 Hz, 15 Kg.

### 3.28 Corrientes Parásitas

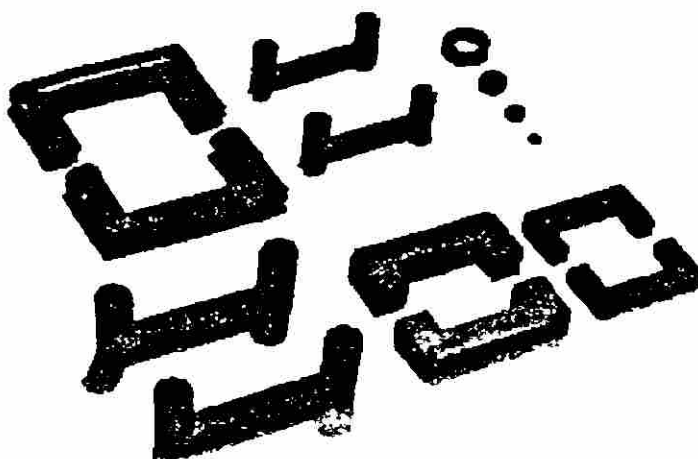
Las corrientes establecidas en los materiales de núcleos magnéticos, debido a los voltajes inducidos originados por la variación de los campos magnéticos, se conocen como corrientes parásitas. La energía perdida en forma de calor, como resultado de la circulación de la corriente parásita en el material del núcleo, se define como la pérdida de la corriente parásita. Ya que esta es proporcional al cuadrado de la frecuencia inducida, llega a ser de una magnitud bastante apreciable cuando se incrementa la frecuencia.

Las corrientes parásitas se pueden reducir al apilar laminaciones en el núcleo, de tal forma que estén en paralelo con el flujo. La oxidación natural de las superficies laminadas también ayuda en gran parte en la reducción de estas corrientes, las laminaciones pueden recubrirse también con una capa delgada de barniz aislante. Pero aún con los núcleos laminados, existe todavía alguna circulación de estas corrientes en las laminaciones individuales. Por lo tanto, a radiofrecuencias, se utilizan ampliamente los materiales de núcleos de polvo de hierro. Cuando la frecuencia sigue aumentando, incluso los núcleos de polvo de hierro no logran ser lo suficiente eficaces para reducir estas pérdidas a un valor apropiado. Entonces se deberán utilizar los núcleos de materiales de ferrita. Las ferritas, a diferencia del hierro o del acero, no son conductores eléctricos.

### 3.29 Núcleos de Polvo de Hierro

Los núcleos de polvo de hierro para bobinas de radio aparecieron por primera vez en el mercado hacia 1930, cuando se utilizaron en transformadores del f-i. Desde ese tiempo hasta la fecha se ha incrementado la demanda de núcleos de polvo de hierro, y también se ha notado una gran mejoría en las técnicas de producción.

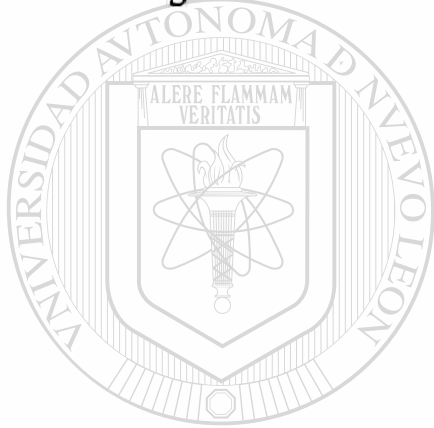
Los núcleos de polvo de hierro se encuentran hoy disponibles para amplia variedad de ampliaciones, y para utilizarse en frecuencias tan altas como 250 MHz. Los receptores de televisión contienen varias bobinas con núcleos de polvo de hierro Fig. 15. Algunos de estos pueden ser de sintonía fija, pero otros pueden ser de sintonía de núcleo móvil, como las bobinas de control de frecuencia horizontal y control de ancho horizontal.



**Figura 15.** Núcleos de polvo de hierro (ferrita) para transformadores de salida horizontal de televisión, y algunos núcleos angulares para bobinas.

El polvo de hierro, utilizado para estos núcleos , se somete primero a un proceso químico que cubre cada una de las diminutas partículas de hierro con una capa aislante. Después se utiliza un aglutinante para agrupar todas las partículas de hierro sumadas a una capa de aislante adicional, sobre la capa de aislante formada por el proceso químico. De esta manera, en el terminado del núcleo las diminutas partículas individuales de hierro son eficazmente aisladas unas de otras, como resultado de esto, la corriente parásitas no puede circular en el núcleo. Todavía habrá una perdida por esta corriente, pero las partículas individuales de hierro son conductores eléctricos y no aisladores y las corrientes parásitas todavía pueden circular en el interior de cada una de las partículas individuales.

La finura de las partículas individuales de hierro, y la cantidad de aglutinante utilizado en proporción con la cantidad de polvo de hierro, serán distintos para diferentes aplicaciones y escalas de frecuencia. El polvo de hierro puede también estar constituido por dos o tres grados diferentes de hierro, mezclado en varias proporciones.



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 4. TRANSFORMADORES

### 4.1 Introducción

Una maquina eléctrica es básicamente un convertidor de potencia que funciona transformando energía de campo magnético en energía de campo eléctrico y viceversa. Las maquinas rotatorias son convertidores dinámicos de potencia (es decir, entra también en juego la energía mecánica). Las maquinas que convierten energía mecánica en energía eléctrica se denominan Generadores, las que convierten energía eléctrica en energía mecánica se denominan Motores, y hay maquinas que convierten energía eléctrica en energía eléctrica, como los Convertidores Rotatorios o los Transformadores.

### 4.2 Transformadores

Las maquinas eléctricas que se utilizan en la actualidad con el fin de convertir potencia siguen el esquema elemental:

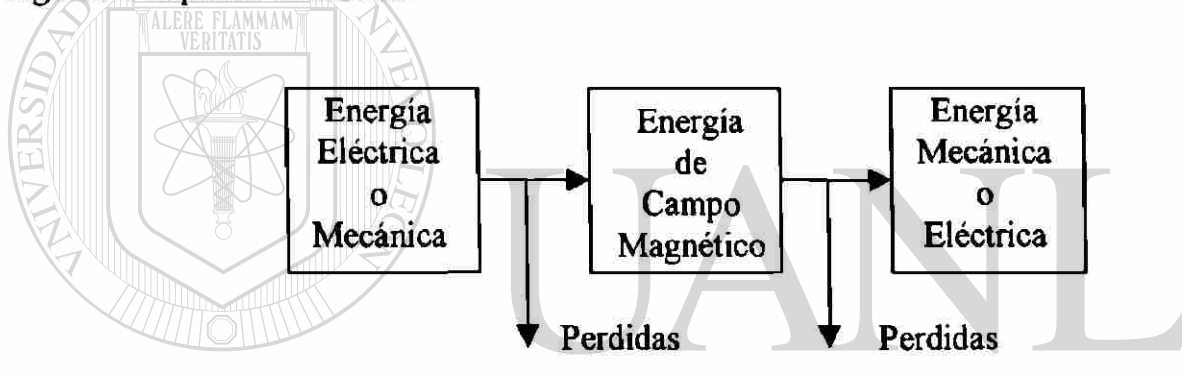


Figura 16. Diagrama a bloques del esquema elemental de las Maquinas Eléctricas.

Existen maquinas que transforman directamente la energía mecánica en energía eléctrica, como la maquina electrostática de Whimshurst o el generador de Van der Graaf. Su principio de funcionamiento se comprende fácilmente del hecho de que al frotar dos materiales entre si, se desprenderán cargas eléctricas de signo opuestos, las cuales pueden ser recogidas por colectores y acumuladas en condensadores. Estas maquinas son impracticables para funcionar como convertidores de potencia (poca eficiencia, gran volumen, etc.) y su aplicación principal esta en la investigación científica.

El estudio del transformador constituye una base para el estudio de las maquinas eléctricas de corriente alterna, ya que se demostrara mas adelante que la mayoría de las maquinas de corriente alterna pueden considerarse como consistentes únicamente en dos circuitos eléctricos acoplados magnéticamente, cuya base es, entonces, el transformador monofasico.

El Instituto Americano de Ingenieros Electricistas da la siguiente definición para un transformador: “ Un transformador es un dispositivo eléctrico, sin partes en movimiento continuamente, que por inducción electromagnética transforma la energía eléctrica de uno a mas circuitos a la misma frecuencia, generalmente con valores cambiados de tensión y corriente “.

Su función es cambiar las magnitudes de voltaje y corriente de lado primario al lado secundario



Se enfocara este estudio al transformador de potencia de baja frecuencia, ya que las maquinas eléctricas de corriente alterna, se construyen generalmente para bajas frecuencias. La siguiente figura ilustra la función principal de un transformador.

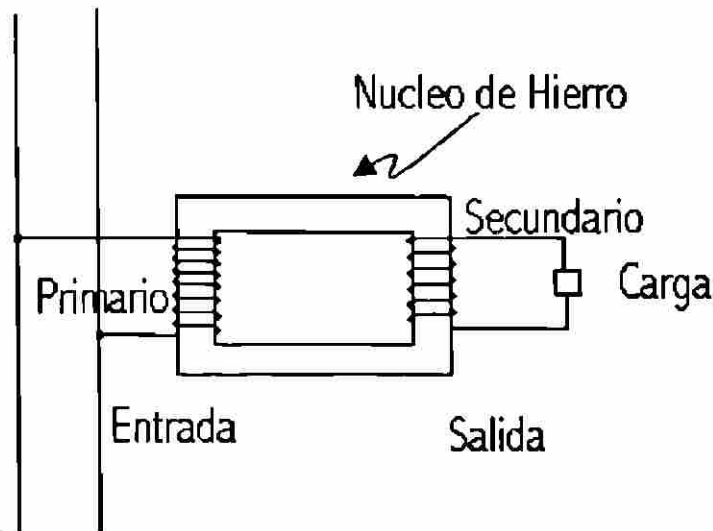


Figura 17. Conexión Básica de un Transformador

#### Eficiencia.

Su principal característica es que su eficiencia es muy alta y es casi la unidad

$$\eta = \text{eficiencia} = P_{\text{salida}} / P_{\text{entrada}}$$

$$\eta = P_{\text{sec}} / P_{\text{primario}}$$

$$\eta > 98\%$$

Dada la alta eficiencia que manifiestan los transformadores, en términos prácticos la potencia que entra al dispositivo es aproximadamente igual a la que sale. Siendo la potencia eléctrica igual al producto del voltaje (diferencia de potencial) por la corriente, entonces un transformador eleva (o disminuye) el voltaje en la misma proporción que disminuye (o eleva) la corriente. Cuando se desea transmitir potencia eléctrica a grandes distancias se trata de manejar siempre voltajes muy altos (del orden de 400,000 V) para disminuir la magnitud de la corriente y, por ende, las pérdidas por efecto Joule ( $P = I^2 R$ ) a través de una línea de transmisión dada.

#### Transformador de distribución.

Es aquel transformador que tiene una capacidad hasta de 500 KVA; hasta 67,000 volts en alta tensión y hasta 15,000 volts en baja tensión.

La presente norma se aplica a transformador de distribución. También se aplica a los autotransformadores incluidos en los límites de capacidad y tensiones aplicadas en el inciso 1, pero considerando su capacidad equivalente como transformador.

### 4.3 Condiciones Generales De Servicio

#### Frecuencia.

La frecuencia de operación debe de ser de 60 Hertz.

#### Temperatura ambiente.

Los transformadores sujetos a estas normas, deben ser apropiados para operar a su capacidad nominal, siempre que a temperatura del ambiente no exceda de 40°C y la temperatura promedio del ambiente durante cualquier periodo de 24 horas no exceda de 30°C (se recomienda que la temperatura promedio del aire refrigerante se calcule promediando las lecturas obtenidas durante 24 horas, ejecutando estas lecturas cada hora. Cuando el ambiente sea el medio refrigerante, se puede usar el promedio de la temperatura máxima y mínima durante el día, por lo general, el valor obtenido en esta forma es ligeramente mayor que el promedio real diario, pero no más de 25°C).

#### Altitud de operación.

Los transformadores de distribución, deben de estar diseñados para una altitud mínima de 1000 metros sobre el nivel del mar.

#### Efecto de la altitud en la elevación de la temperatura.

El aumento de la altitud produce disminución en la densidad del aire, lo cual a su vez incrementa la elevación de la temperatura en los transformadores que dependen del aire para su disipación del calor.

#### Efecto de la altitud en la rigidez dialéctica del aire.

El aumento en la altitud produce disminución en la densidad del aire, lo cual a su vez disminuye la tensión del flameo. La rigidez dialéctica de algunas partes de un transformador, que depende total o parcialmente del aire para su aislamiento, disminuye conforme la altitud, aumenta. Para una clase de aislamiento, dada la rigidez dialéctica a 100 metros de altitud, debe multiplicarse por el factor de corrección apropiado para la nueva altitud a fin de obtener la nueva rigidez dialéctica a la altitud especificada.

La altitud de 4500 metros es considerada la máxima para transformadores normales.

#### Operaciones a tensiones superiores a la nominal

Los transformadores deben ser capaces de operar:

- Con 5% arriba de la tensión nominal del secundario a capacidad nominal en KVA, sin exceder los límites de sobre-elevación de temperatura. Este requisito se aplica cuando el factor de potencia de la carga es de 80% o mayor.
- Con 10% arriba de la tensión nominal del secundario en vacío, sin exceder los límites de sobre-elevación de temperatura.
- Para cualquier derivación se aplican los mismos requisitos anteriores.

#### Rigidez dialéctica del líquido aislante.

La rigidez dialéctica del líquido aislante nuevo no debe ser menor de 28 KV.

### Condiciones especiales de servicio.

Condiciones de servicio fuera de las indicadas en los párrafos anteriores se deben especificar previamente al fabricante. Ejemplo de algunas de estas condiciones son las siguientes:

- Vapores o atmósferas dañinas, exceso de polvo, polvo abrasivo, mezclas explosivas de polvo o gases, vapor de agua, ambiente salino, humedad excesiva, etc.
- Vibraciones anormales, golpes o cambios de posición.
- Temperatura ambiente excesivamente bajas o altas.
- Condiciones de transporte o almacenaje poco usuales.
- Limitaciones de espacio.
- Otras condiciones de operación, dificultades de mantenimiento, tensión desbalanceada, forma de onda deficiente, necesidades especiales de aislamiento, etc.

### 4.4 Clasificación.

Los transformadores se clasifican por su condición de servicio en:

- Para uso interior.
- Para uso exterior.

Los transformadores se clasifican por su sistema de disipación de calor como sigue:

- a) Transformadores secos, enfriados por aire.
  - Auto-enfriado (Clase AA).
  - Enfriados por aire forzado (Clase AFA).
  - Auto-enfriados/enfriados por aire forzado (Clase AA/FA).
- b) Transformadores sumergidos en líquidos aislantes enfriados por aire.
  - Auto-enfriados (Clase OA).
  - Auto-enfriados/enfriados por aire forzado (Clase OA/FA).

Los transformadores se clasifican por su lugar de instalación como sigue:

- Para instalarse en postes, (Tipo Poste).
- Para instalarse en subestaciones (Tipo Subestacion).

### 4.5 Especificaciones Eléctricas.

#### Capacidad nominal en KVA.

La capacidad nominal de un transformador es la capacidad que el devanado secundario del mismo debe suministrar en un tiempo especificado (continuo o limitado) a su tensión y frecuencias nominales, sin exceder los límites de temperatura correspondencia dentro de las condiciones establecidas en esta forma.

**Capacidades Nominales Preferentes En Kva De Transformadores Monofasicos**  
5, 10, 15, 25, 37.5, 50,75, 100, 167, 250, 333, 500

**Capacidades Nominales Preferentes En Kva De Tansformadores Trifasicos**  
15, 20, 45, 75, 112.5, 150, 225, 300, 500

### Especificaciones de nivel de ruido.

Los transformadores deben de estar contruidos para que el promedio del nivel de ruido no exceda los decibeles especificados en la siguiente tabla cuando el transformador sea excitado a tensión nominal, sin carga y sea medido en las condiciones indicadas en el método de prueba.

Los valores en decibeles indicados en la tabla corresponden a los KVA nominales equivalentes a un transformador de dos devanados con la elevación de temperatura permitida por esta norma, para cualquier frecuencia hasta 60 Hertz.

Equivalentes a dos devanados, KVA	Nivel de ruidos en decibeles			
	Tipo			
	AA	AFA	OA	FA
Hasta 300 -----	66	70	56	60
301 a 500 -----	68	71	58	61

Tabla 2. Valores de nivel de ruido de transformadores

### Polaridad de los transformadores monofasicos.

Todos los transformadores monofasicos son de polaridad substractiva.

### Desplazamiento angular de transformadores trifasicos.

El desplazamiento angular entre las tensiones de alta y baja tensión, en transformadores con conexiones Delta-Delta o Estrella-Estrella, es de  $0^\circ$  como se muestra en los diagramas (a) y (b) de la figura 18. El desplazamiento angular entre las tensiones de alta y baja tensión, en transformadores con conexiones Estrella-Delta o Delta-Estrella, es de  $30^\circ$  con la baja tensión atrasada respecto a la alta tensión, como se muestra en los diagramas (c) y (d), de la figura.

La secuencia de fases es el orden 1, 2, 3 y con el sentido indicado de la figura.

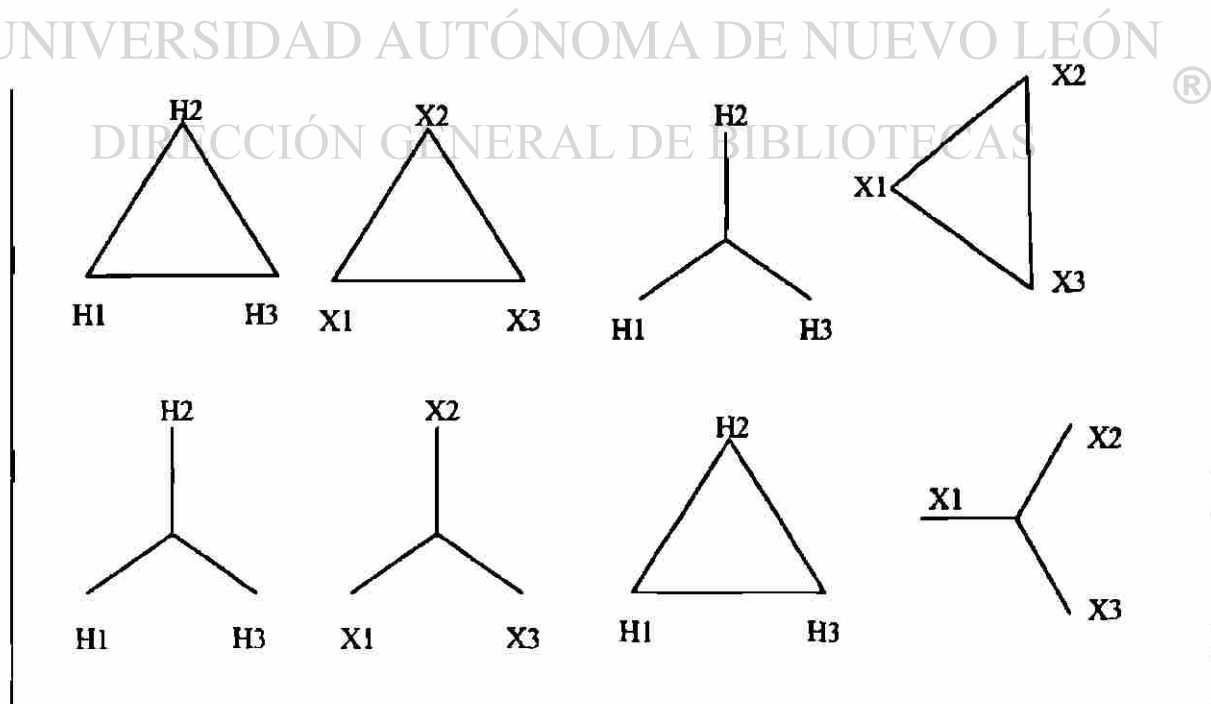
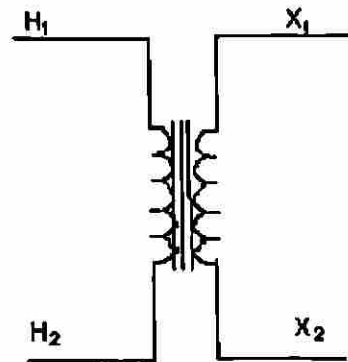


Figura 18 Desplazamiento angular entre alta y baja tensión en transformadores

## 4.6 Designación De Terminales

Los devanados de un transformador se distinguen uno del otro como sigue:  
En los transformadores de dos devanados, el de alta tensión se designa con la letra H y el de baja y tensión con la letra X.

### Terminales de Alto y bajo Voltaje



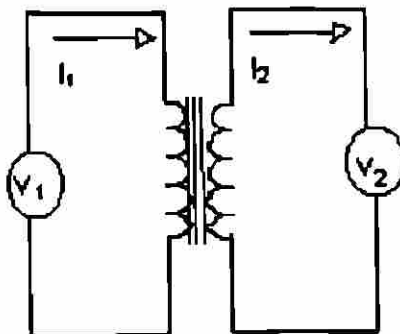
H<sub>1</sub> y H<sub>2</sub> = terminales de alto voltaje  
X<sub>1</sub> y X<sub>2</sub> = terminales de bajo voltaje

Figura 19. Terminales de "Alta" y de "Baja" de un transformador

En los transformadores de dos de mas devanados, estos se designan con las letras H, X, Y, Z. La secuencia de esta designación se determina como sigue:  
El devanado de tensión mas alta se designa con la letra H y los demás devanados con las letras X, Y Z en orden decreciente de las tensiones.  
En el caso de que dos o más devanados tengan la misma tensión pero diferente capacidad en Kva, se asignan las letras en orden decreciente según la capacidad.

## 4.7 Relación de transformación

Es la capacidad que presenta el transformador en variar el voltaje y la corriente del primario al secundario.



$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$a$  = relación de transformación

$N_1$  = numero de vueltas de la bobina del primario

$N_2$  = numero de vueltas de la bobina del secundario

$I_1$  = corriente del primario

$I_2$  = corriente del secundario

Figura 20. Relación de transformación

## 4.8 Bancos Estrella-Delta

Si el neutro del lado de alta tensión del banco de transformador se conecta al neutro del sistema, el banco puede quemarse por las siguientes razones:

- Se producirán corrientes circulantes en Delta que tratan de equilibrar cualquier carga desequilibrada conectada a la línea de primario.
- Actuara como un banco de puesta a tierra y suministra corriente de cortocircuito a cualquier cortocircuito en el sistema en el cual esta conectado.
- El devanado en Delta forma un circuito cerrado por el que circularan las corrientes de la tercera armónica.
- Puede sobrecargarse si se quema un fusible en caso de cortocircuitos a tierra, dejando el banco con la capacidad de un banco conectado en Estrella abierta Delta abierta.

El resultado de todos estos efectos es que el banco se ve forzado a conducir corrientes adicionales a su corriente normal de carga. La suma de las corrientes es, en muchas ocasiones, suficientes para quemar el banco.

Cuando se utilizan conexiones en Estrella-Delta y el neutro del lado de alta tensión del transformador no se conecta al neutro del circuito, un conductor desconectado en el circuito, del primer trefilar convierte el banco en un conjunto con entrada y salida monofasicas. Si el banco alimenta circuitos de motores, se producirán sobrecorrientes peligrosas en cada uno de los circuitos de, motores trifasicos. La corriente que pasa por los dos de los conductores del circuito alimentador de motores será de igual magnitud, mientras que la del tercer conductor será igual a la suma de dichas corrientes.

## 4.9 Bancos Delta-Delta

Para poder tener cargas equilibradas en los transformadores, todas las unidades deben:

- Estar conectadas en la misma posición de las derivaciones.
- Tener la misma relación de tensión.
- Tener la misma impedancia.

Un banco de tres transformadores puede hacerse funcionar a potencia reducida con una pequeña carga desequilibrada, si dos de las unidades tienen la misma impedancia y la tercera unidad tiene una impedancia comprendida entre  $\pm 25\%$  de las unidades iguales. En la tabla siguiente se indica la distribución de la carga según la relación de desequilibrio (  $Z_1$  = impedancia de la unidad distinta, y  $Z_2$  = impedancia de las unidades iguales ).

Relación $Z_1 / Z_2$	Porcentaje de carga* en	
	Unidad distinta	Unidades Iguales
0.75	109.0	96.0
0.8	107.0	96.5
0.85	105.2	97.3
0.9	103.3	98.3
1.1	96.7	102.0
1.15	95.2	102.2
1.2	93.8	103.1
1.25	92.3	103.9

**Tabla 3.** Porcentajes de carga en un transformador dependiendo de la relación  $Z_1$  en  $Z_2$

Con cargas desequilibradas, debe compararse que ningún transformador quede sobrecargado.

#### 4.10 Protección De Motores.

Referente bancos conectados en Estrella-Delta-Estrella, con neutro aislado. Por lo general, la protección contra sobrecargas utilizada en los circuitos de alimentación de motores, consiste en un dispositivo de protección en solo dos de los tres conductores. Si se desconecta un conductor del circuito de alimentación del primario, pueden producirse tensiones anormalmente elevadas, lo cual puede desequilibrar notablemente la corriente en el circuito del motor. Si ocurriera que la corriente mas alta de las tres es la que pasa por el conductor sin proteger, las posibilidades de que el motor se queme aumentarían considerablemente. El instalar un tercer dispositivo de protección contra sobrecargas en cada uno de los conductores de alimentación de motores, elimina la posibilidad de averías del motor por esta razón. El hecho de utilizar tres dispositivos de protección se justifica por la posibilidad existente de que se abra una línea del primario del transformador. Tal posibilidad queda afectada por el tipo y disposición de los dispositivos de protección y de maniobra utilizados en esa parte del sistema.

#### Sobrecargas momentáneas

Las siguientes recomendaciones de carga, pueden utilizarse para estos transformadores provistos de modernos sistemas de aislamiento térmico.

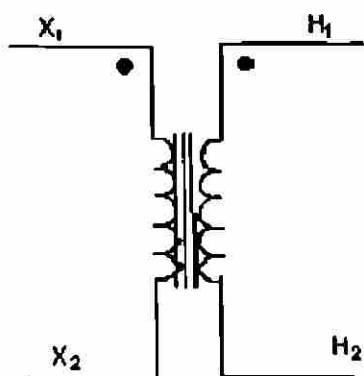
Transformadores en baño de aceite, enfriados por ventilación natural, temperatura del aire ambiente 30°C (según las normas ASA, suplemento C57 9206 200).

Duración	Veces la corriente nominal
2 segundos	25.0
10 segundos	11.3
30 segundos	6.7
60 segundos	4.75
5 minutos	3.0
30 minutos	2.0

**Tabla 4.** Tiempos de sobrecargas permitidos en transformadores

## 4.11 Análisis De Los Transformadores

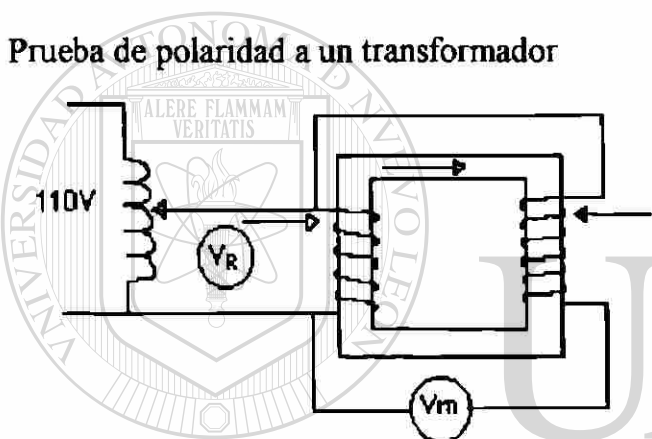
### Polaridad de el transformador



Los subíndices indican la Polaridad de las maquinas y como se deberá conectar en paralelo  
 Los puntos indican que la corriente entra en el lado X<sub>1</sub> y sale en el lado H<sub>1</sub>

Figura 21. Terminales indicando la polaridad de un transformador

### Prueba de polaridad a un transformador



Se puentea una terminal de alta y otra de baja

$$\phi = \phi_1 + \phi_2$$

$$V_m > V_R$$

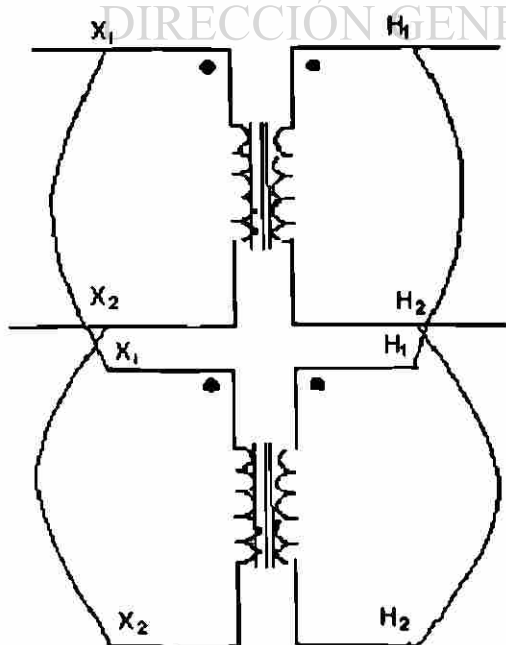
X y H tienen diferente polaridad

$$V_m < V_R$$

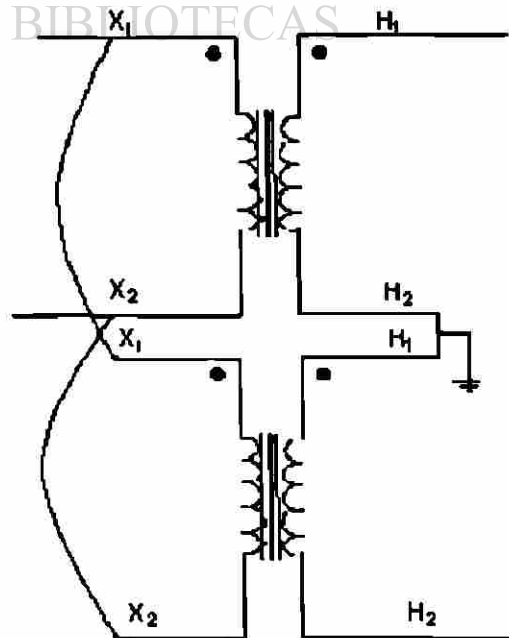
H y X tiene la misma polaridad

Figura 22. Prueba de polaridad de un transformador

### Conexiones serie y paralelo



Paralelo // paralelo



Paralelo // serie



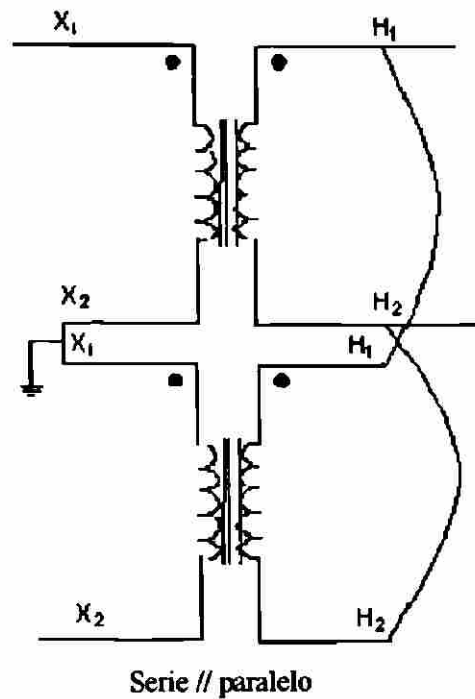


Figura 23 Conexiones serie – paralelo de un transformador

### Métodos para el análisis de un transformador

- ✓ Mediante pruebas de laboratorio
- ✓ Analizarlo mediante el método de circuito equivalente de parámetros.

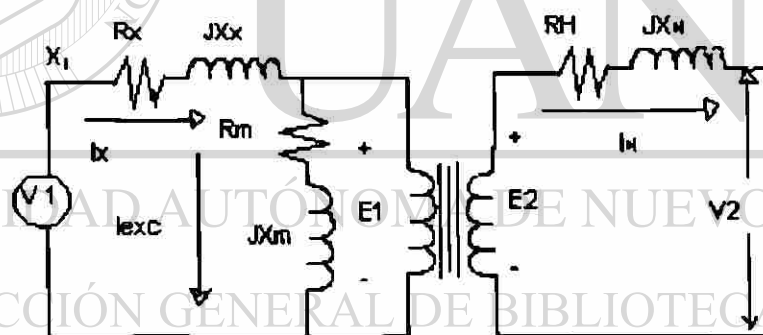


Figura 24. Modelo de 6 parámetros, el lado de baja tensión como primario.

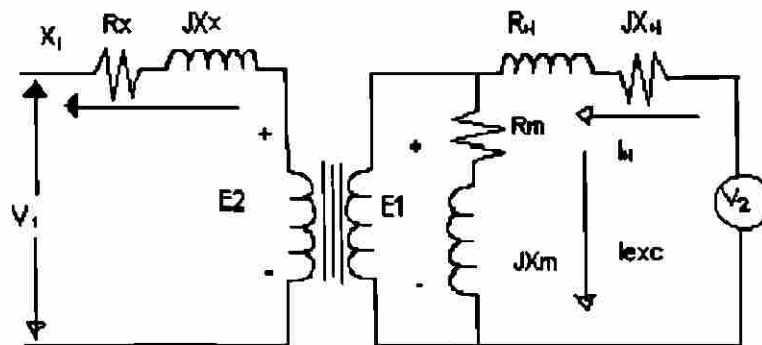
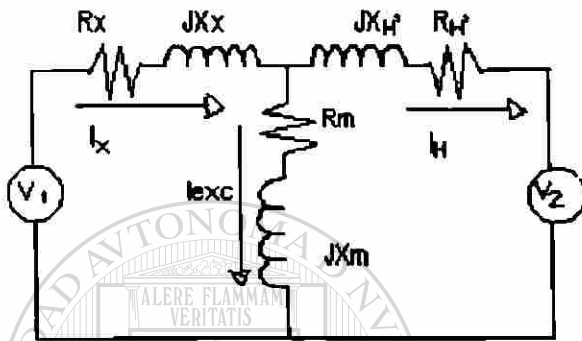


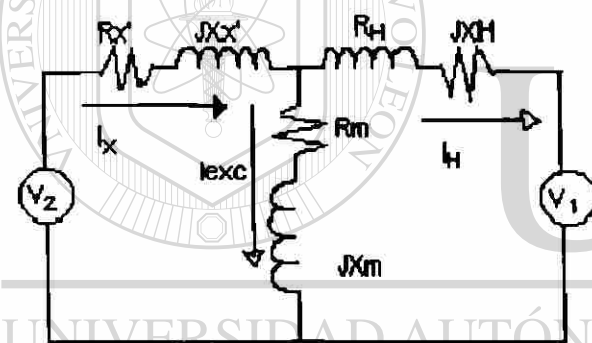
Figura 25. Modelo de 6 parámetros tomando el lado de alta tensión como primario.

Parámetros

$E_1$ y $E_2$	Voltaje Inducidos Internos
$V_1$ y $V_2$	Voltaje en terminales (externos)
$R_m + jX_m$	Rama de excitación (solo en los lados primarios)
$R_x$	resistencia del devanado de baja tensión
$R_H$	resistencia del devanado de alta tensión
$jX_x$	Reactancia de disipación del devanado de baja tensión
$jX_h$	Reactancia de disipación del devanado de alta tensión.
$I_x$	Corriente de baja.
$I_H$	Corriente de alta.
$I_{exc}$	corriente de excitación.



Circuito Reflejado al lado de baja tensión



Circuito Reflejado al lado de alta tensión

Figura 26. Reflexión de impedancias en un transformador

4.12 Obtención de los 6 parámetros del transformador realizando 2 pruebas.

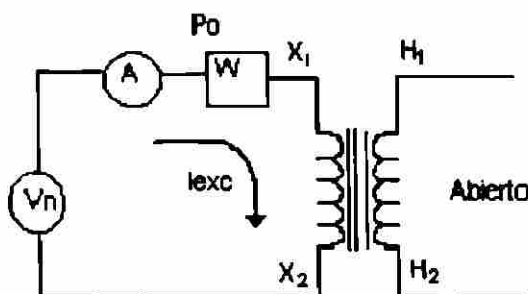
- a) Prueba de Vacío (para determinar  $R_m$  y  $X_m$ )
- b) Prueba de Corto circuito (para determinar  $R_x$ ,  $X_x$ ,  $R_H$  y  $X_H$ )

Prueba de vacío

Se recomienda que se alimente el lado de baja tensión.

Condiciones de la prueba.

1. aplicar el voltaje nominal
2. el secundario abierto (sin carga).



$P_o$  = Potencia de vacío  
 $I_{exc}$  = Corriente de Excitación  
 $V_n$  = Voltaje Nominal

$$R_m = (P_o / I_{exc}^2) - R_x$$

$$X_m = X_T - X_x$$

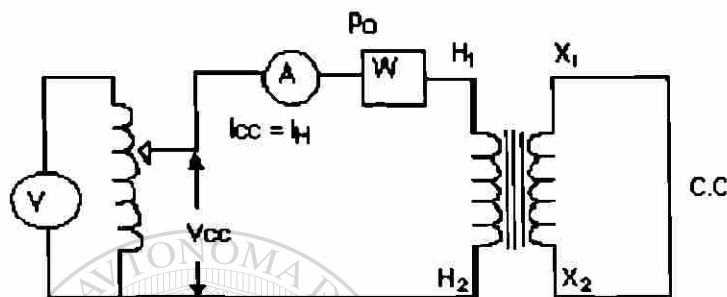
$$X_T = \sqrt{(V_m / I_{exc})^2 - (R_x + R_m)^2}$$

Prueba de Cortocircuito.

Se recomienda que se alimente el lado de alta tensión.

Condiciones de la prueba.

1. Cortocircuito en el secundario.
2. Aplicar un voltaje bajo al lado que se alimenta para que el transformador tome la corriente nominal de ese lado.



$V_{cc}$  = Voltaje de CC  
 $P_{cc}$  = Potencia de CC  
 $I_{cc}$  = Corriente de CC = I nominal.

$$R_H = R_{X'}$$

$$R_H + R_{X'} = P_{cc} / I_{cc}^2$$

$$X_T = X_H + X_{X'}$$

$$X_H = X_{X'}$$

$$X_T = \sqrt{(V_{cc} / I_{cc})^2 - (R_H + R_{X'})^2}$$

#### 4.13 Transformadores Trifasicos.

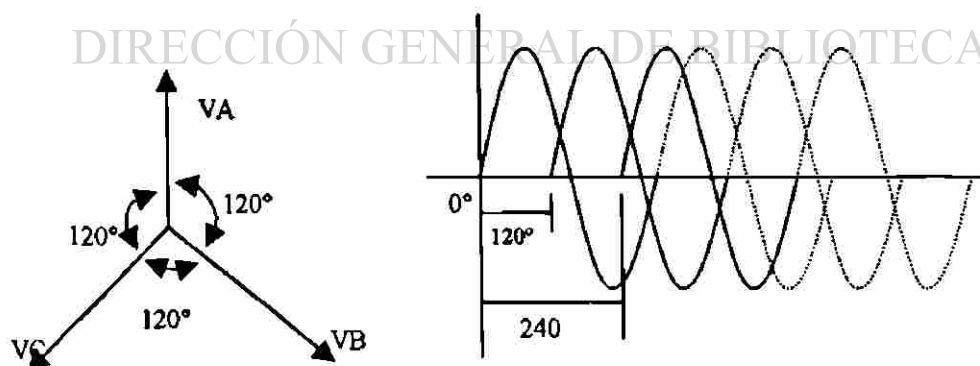
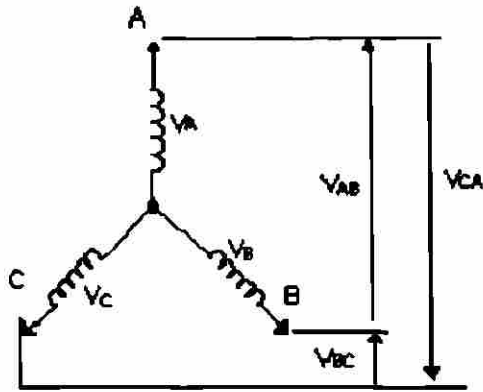


Figura 27. Forma de onda del voltaje trifasico

Conexiones de los transformadores.

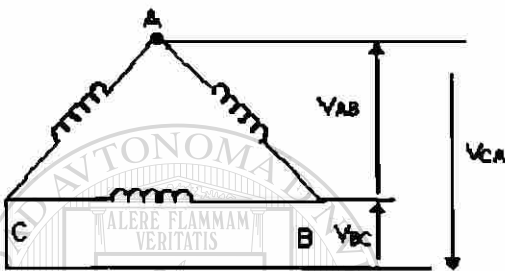


$V_{AB}, V_{BC}, V_{CA} =$  Voltaje de línea  
 $V_A, V_B, V_C =$  Voltaje de fase

$$V_L = \sqrt{3} V_f$$

$$I_L = I_f$$

a) Estrella



$$V_A = V_B = V_C = V_{AB} = V_{BC} = V_{CA}$$

$$I_L = \sqrt{3} I_f$$

$$V_L = V_f$$

b) Delta.

Figura 28. Conexiones delta-estrella de un transformador

4.14 Conexiones entre transformadores monofasicos para formar transformadores trifasicos.

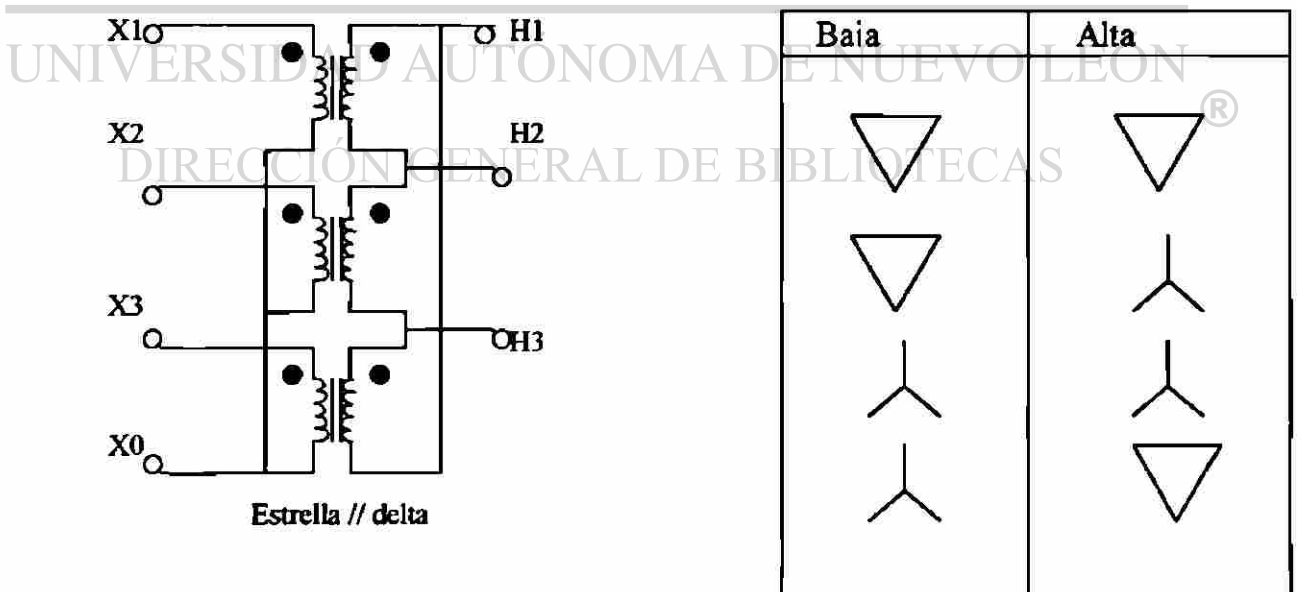
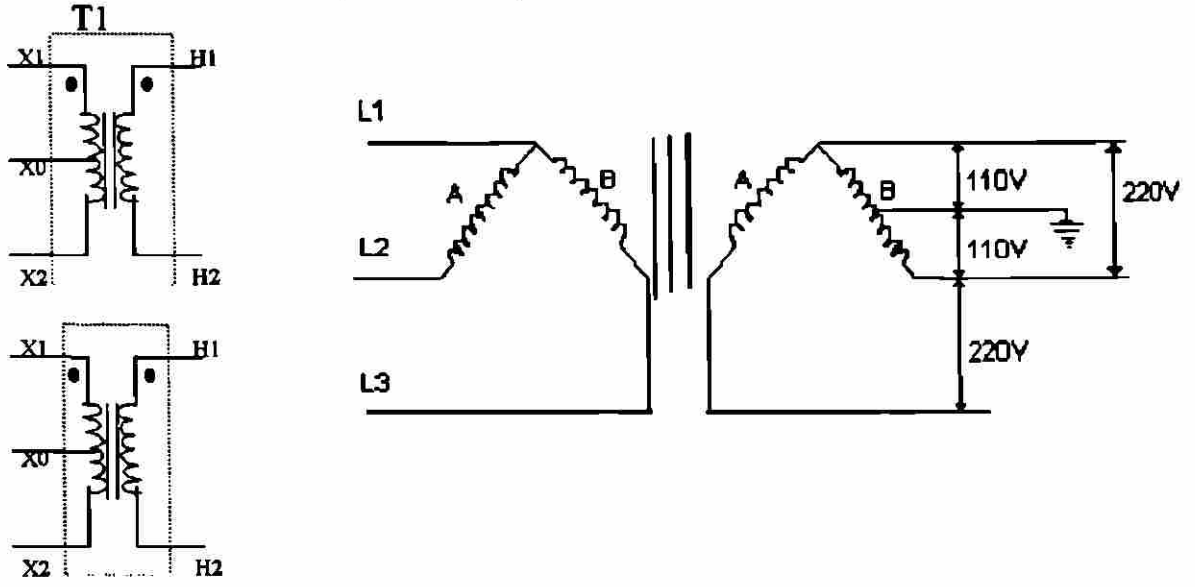


Figura 29 Conexión de tres transformadores monofasicos para formar uno trifasico.

Transformador de Distribución (delta abierto) comercial



T2 **Figura 30** Transformador de distribución comercial delta-abierto

4.15 Regulación de Voltaje

La regulación de voltaje significa que tanto cae el voltaje desde el vacío a la plena carga.

$$\text{Regulación} = \% \text{Reg}$$

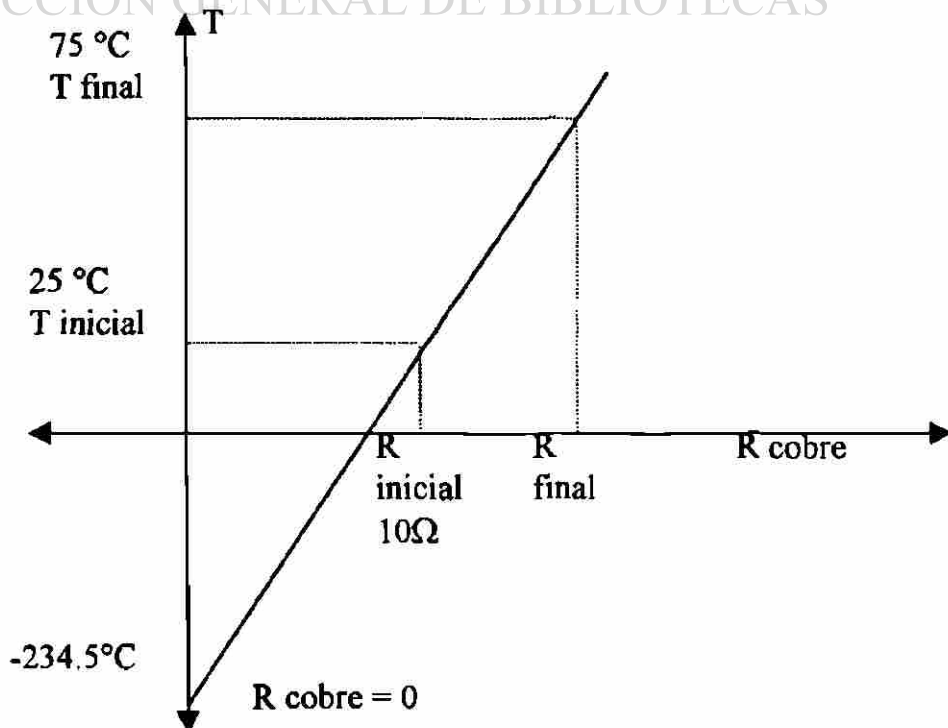
$$\% \text{Reg} = (V_o - V_n / V_n) \times 100$$

$V_o$  = Voltaje de Vacío     $V_n$  = Voltaje bajo Carga.

4.16 Corrección de Resistencia por Temperatura.

Ejemplo:  $R = 10 \Omega$  a  $25^\circ$

$R = ?$  a  $75^\circ$



$$\frac{T_{\text{inicial}} + 234.5^{\circ}\text{C}}{R_{\text{inicial}}} = \frac{T_{\text{final}} + 234.5^{\circ}\text{C}}{R_{\text{final}}}$$

$$R_{\text{final}} = \left( \frac{T_{\text{final}} + 234.5^{\circ}\text{C}}{T_{\text{inicial}} + 234.5^{\circ}\text{C}} \right) R_{\text{inicial}}$$

$$R_{\text{final}} = \left( \frac{75^{\circ}\text{C} + 234.5^{\circ}\text{C}}{25^{\circ}\text{C} + 234.5^{\circ}\text{C}} \right) 10 \Omega$$

$$R_{\text{final}} = 11.92 \Omega$$

#### 4.17 Fabricación De Transformadores Comerciales

Los transformadores TUSA son producidos en un amplio parque industrial, equipado con la maquinaria mas avanzada e instrumentos de extrema precisión. Por eso, desde la fabricación los ensayos y el riguroso control de calidad en la recepción de los materiales hasta las pruebas finales, dan garantías de productos eficientes con calidad a la altura del nombre Siemens.

##### Transformadores normalizados

Son transformadores para instalación en redes aéreas de distribución de energía eléctrica, con niveles de aislamiento de clase tensión 15 y 25 kv., en aceite mineral aislante, refrigerados naturalmente, adecuados para montaje en poste.

##### Características básicas

Norma genérica  
NOM-J-116-1989

##### Ejecución

Tanque sellado

##### Potencias normalizadas Kva

30,45,75,112.5,150,225

##### Frecuencia (Hz)

60

##### Grupo de conexiones

$\Delta$ -Y con neutro fuera del tanque

##### Tensiones primarias(V)

15kV: 13860/13530/13200/12870/12540  
25kV: 24150/23575/23000/22425/21850

## Conmutaciones con el transformador desenergizado

Por conmutador interno accionado a través del registro de mano localizado en la tapa del transformador hasta 150 KVA y accionamiento externo para 225 kVA.

Tensión secundaria (V)  
440/254 ó 220/127

### Núcleo

Construido con lamina de acero al silicio rolada en frío, tipo grano orientado.

### Devanados

Primario: construido con conductores de sección circular, aislados con esmalte reforzado, clase térmica B (130°C).

### Material del tanque

Fabricado con lamina de acero SAE 1010/1020, con los siguientes espesores:

Tapa: 2.65mm.  
Cuerpo: 2.65mm.  
Fondo: 3.0mm.

### Radiadores

Los disipadores de calor son radiadores de tubo de acero con espesor de 1.6mm, soldados al tanque.

### Hermeticidad de las soldaduras

Es probada con cada unidad con liquido penetrante regente a rayos ultravioleta.

### Pintura del tanque

Interna: después de la limpieza mecánica y con solventes de las superficies, se aplica una mano de pintura epoxi-poliamida con pigmentos de oxido de hierro con 30 micras de espesor.

Externa: la superficie son limpiadas con chorros abrasivos al estándar SA 2 ½ de la norma SIS 055900. Como fondo se aplican dos manos de pintura eposi-poliamida, tipo alto espesor con pigmentos de oxido de hierro aplicadas por procesos flooding, con un espesor total de 100 micras. La terminación es hecha con una mano de pintura de poliuretano alifático, gris claro, pigmento de dióxido de titanio y un espesor de 40 micras.

### Indicación del nivel de aceite

Por medio de una marca indeleble en la pared interna del tanque para transformadores hasta 150 kVA e indicador magnético para los de 225 kVA.

### Registro de mano

Destinado para la inspección visual de la parte superior del transformador, para accionar el conmutador de tensiones y para verificar el nivel de aceite. Esta localizada en la tapa del tanque con empaques y resaltos para evitar la penetración de la humedad.

**Boquillas terminales****Alta Tensión**

Boquilla de porcelana sólida con terminal tipo presilla, para un diámetro de entrada de 13 $\phi$ mm; fijados internamente en la tapa.

**Baja Tensión**

Boquilla de porcelana sólida con terminal tipo presilla para cable de acuerdo a lo indicado de los dibujos de dimensiones, fijado internamente en el tanque.

**Placa de datos**

Confeccionada en placa de aluminio adonizado de 100 x 1300 mm con los datos de identificación del transformador y del esquema de conexiones de devanados y derivaciones.

**Garantía de calidad**

Todos los productos TUSA-Siemens son elaborados dentro del sistema Garantía de Calidad, desacuerdo con los parámetros fijados por la Norma ISO 9000.

**Pruebas de rutina**

Todos los transformadores fabricados son sometidos a las siguientes pruebas:

- Resistencia óhmica de los devanados
- Relación de transformación
- Resistencia del aislamiento
- Desplazamiento angular
- Secuencia de fases
- Pérdidas de excitación
- Pérdidas en carga
- Corriente de excitación (IO)
- Tensión de otro circuito (Z)
- Tensión aplicada al dieléctico
- Tensión inducida

**Pruebas tipo**

Son efectuadas periódicamente, por criterio de muestras para mantener el control total de los procesos productivos, las siguientes pruebas:

- Tensiones de impulso
- Elevación de temperatura
- Factor de potencia de aislamiento
- Ruido
- Radio interferencia

**Pruebas especiales**

Son efectuadas pruebas de resistencia dinámica al corto circuito en los transformadores fabricados como prototipos de nuevas series de productos.



## Dimensiones

Potencia	Dimensiones (mm)					
(kVA)	Largo C		Ancho L		Alto A	
	15kV	24.2kV	15kV	24.2kV	15kV	24.2kV
15	730	735	520	450	825	1075
30	870	795	520	545	865	1115
45	910	965	540	555	900	1140
75	1095	1145	650	640	955	1175
112.5	1260	1300	725	745	1005	1225
150	1300	1335	740	755	1055	1315
	Aceite		Total			
	15kV	24.2kV	15kV	24.2kV		
		V				
	25	45	155	190		
	30	55	200	260		
	40	65	225	320		
	50	85	345	430		
	70	105	470	550		
	85	135	570	685		

Potencia	Dimensiones (mm)					
(kVA)	Largo C		Ancho L		Alto A	
	15 kV	25 kV	15 kV	25 kV	15 kV	25 kV
225	1350	1400	750	775	1465	1600

Potencia	Masa (Kg)					
(kVA)	Aceite		Total			
	15 kV	25 kV	15 kV	25 kV		
225	200	240	900	945		

Tabla 5 Dimensiones de transformadores según su potencia

## 4.18 Principales materiales y componentes de nuestros transformadores

## Bobinas

La construcción de nuestras bobinas es procesada con cobre electrolítico de muy alta conductividad, en todos los devanados con forro apropiado para alta temperatura, garantizado así menores pérdidas.

## Aislamientos

Los aislantes que se utilizan en la construcción de las bobinas generalmente cuentan con un recubrimiento de resina termofraguante (clase térmica para 120°C) que permiten que al someter nuestras bobinas al horno proporcione una alta resistencia eléctrica y mecánica, existen otros tipos de aislamientos como son cartón presspan, papel crepe, nomex mylard, estermat, rag-mylard, copaco etc. (se utilizan de acuerdo al equipo que se requiera).

## Núcleo

El corte de nuestros núcleos es elaborado con lamina de acero al silicio grano orientado calidad M-3 O M-4 de alta permeabilidad magnética y además tienen un recubrimiento en la superficie, que llega a soportar hasta 800° C de temperatura.

Debido a todas estas ventajas obtenemos muy bajas pérdidas eléctricas y un nivel de ruido muy por debajo de lo que marcan las normas oficiales.

## Tanques

Elaborados con lamina rolada engrío de diferentes calibres y después de un proceso de limpieza se aplica un primario y después un acabado alquidalcio color gris claro según normas.

## Líquido Aislante

El aceite utilizado en nuestros equipos es fabricado por PEMEX, es clasificado como no inhibido Núm. 1 para uso eléctrico con las tensiones nominales.

## 4.19 Tipos Comerciales De Transformadores

### Tipo Poste

Los transformadores Tipo Poste, están diseñados específicamente para aplicaciones donde la distribución de energía eléctrica sea aérea. La aplicación convencional de este tipo de transformadores es la distribución eléctrica ciudadana, rural o industrial. En unidades monofásicas desde 10 KVA hasta 100 KVA, en clase 15KVA, en clase 15,25, y 34.5 KV.

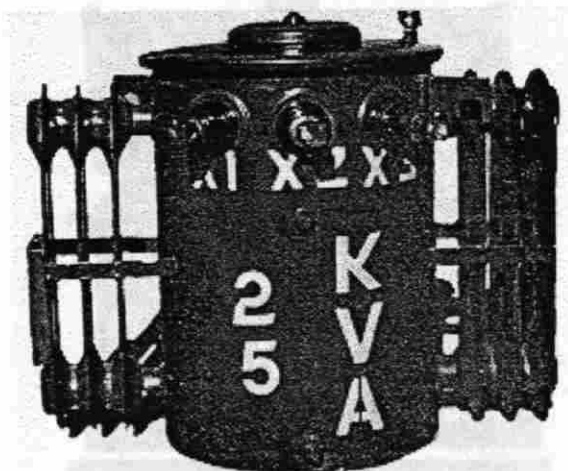


Figura 31 Transformador tipo poste

### Tipo Estación

Este tipo de unidades tienen su aplicación principal en edificios comerciales, hoteles, hospitales, industrias y aquellos lugares donde la instalación del transformador sea en una subestación interior o intemperie, sobre piso. Estos transformadores se fabrican desde 225 KVA a 500 KVA, en clases 15,25 y 34.5 KV.

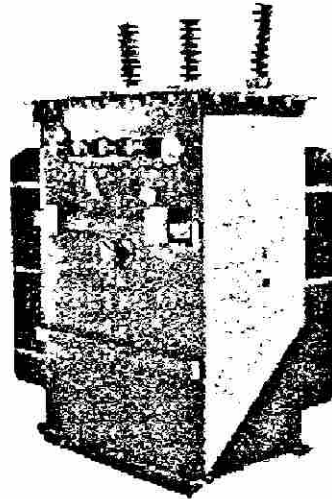


Figura 32 Transformador tipo estación

### Tipo Pedestal

Los transformadores Tipo Pedestal, son unidades diseñadas para la distribución subterránea comercial o residencial de energía eléctrica, que por su aspecto armonizan plenamente con la arquitectura moderna en fraccionamientos residenciales, centros comerciales, condominios, industrias, etc. Se fabrican en unidades monofásicas desde 15 KVA hasta 75 KVA, en clases 15 y 25 KV y en unidades trifásicas desde 45 KVA hasta 500 KVA, en clases 15 y 25 KV.



Figura 33 Transformador tipo pedestal

## 4.20 Transformadores De Potencia

Los transformadores de potencia están diseñados para llenar los requerimientos de energía eléctrica para la alimentación de edificios comerciales, hoteles, hospitales, plantas industriales, etc. donde la instalación de la subestacion sea interior o intemperie y sobre

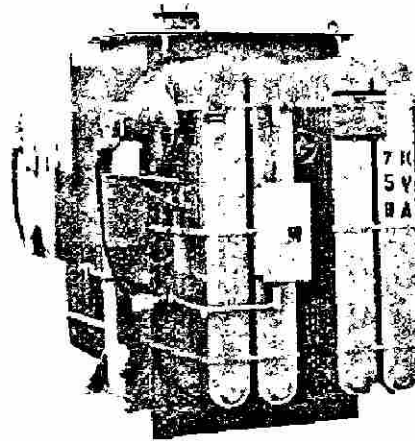


Figura 34 Transformador de potencia

## 4.21 Transformadores Para Control y Alumbrado

Los transformadores para control y alumbrado Tipo Seco, tienen su aplicación en centros de estación de alumbrado o circuitos de control. Se fabrican en unidades monofásicas desde 10 KVA a 167 KVA, en clases 1.2, 2.4 y 5 KV; y en unidades trifásicas, de 15 KVA a 500 KVA, en clases 1.2, 2.4 y 5 KV.

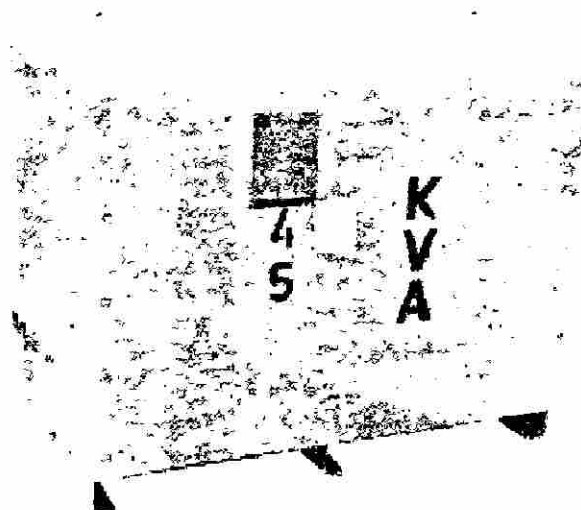


Figura 35 Transformador de para control y alumbrado

#### 4.22 Programa Recomendado Para Pruebas De Mantenimiento.

No. Prueba de Mantenimiento	Programa
1. Liquido aislante.	<i>Anual</i>
a) Resistencia dialéctica.	
b) Numero de neutralización.	
c) Color.	Anual
2. Resistencia de aislamiento.	Anual
3. Indice de polarización.	Anual
4. Factor de potencia.	Anual
5. Alto potencial de CA (Hi-Pot)	Cada 5 años
6. Prueba de voltaje inducido.	Cada 5 años

Tabla 6 Programa recomendado para pruebas de mantenimiento en transformadores

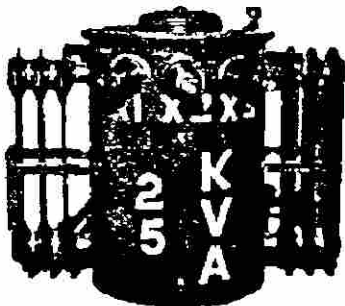
#### Limites De Prueba Para Aceite Tipo Mineral

Prueba	Satisfactorio	Debe ser Filtrado	Descártese y Reemplácese
Resistencia dialéctica (ASTM D-877)	23 KV	Menos de 22 KV	-
Numero de neutralización	0.4 Más.	0.4 a 1.0	Mayor de 1.0
Color	3 ½ Máx,	Arriba de 3 ½	-

Tabla 7 Limite de prueba para aceite tipo mineral en transformadores

#### Especificaciones

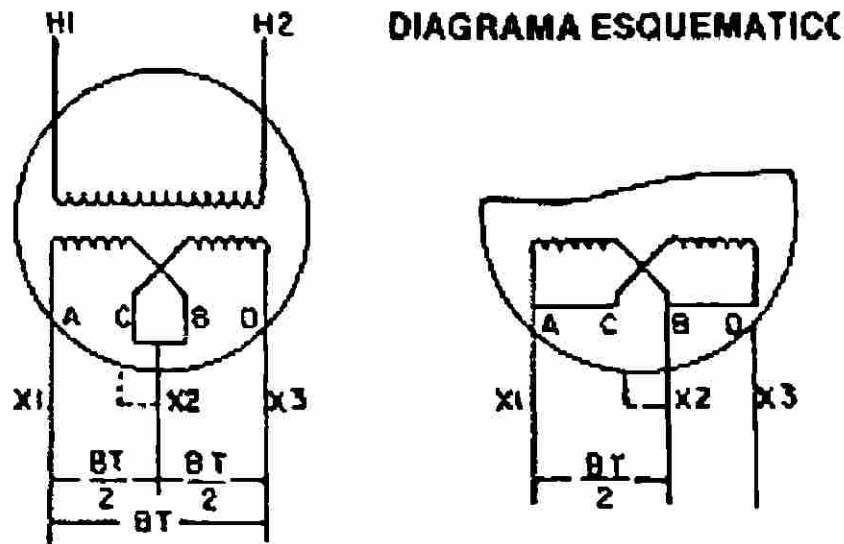
Tensión Primaria: 440 Volts Tensión Secundaria: 120/240 Volts Frecuencia: 60 Hertz  
 Sobre-elevacion de Temperatura: 65°C sobre la del ambiente, con un media de 30°C y una máxima de 40°C Derivaciones a Plena Capacidad: Sin Altura de operación: 2000 m.s.n.m.  
 Tipo de Enfriamiento: Autoenfriado-OA Normas de Fabricación: NOM-J-116



Transformador Tipo Poste de 25 KVA, 440 120/240 Volts, una Fase

KVA	MODELO
10	RMPO-10
15	RMPO-15
25	RMPO-25
37.5	RMPO-37

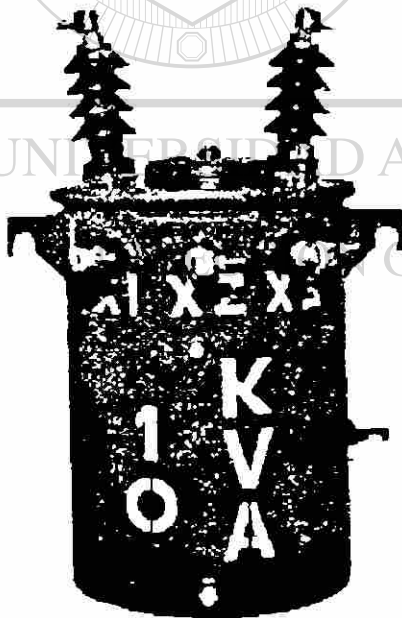
Figura 36 Transformador comercial tipo poste monofasico de 25 KVA y tabla de modelos hasta 37.5 KVA



**Figura 37** Diagrama esquemático del transformador comercial tipo poste monofasico de 25 KVA.

### Especificaciones

Tensión primaria: 13,200 Volts Tensión secundaria: 120/240 Volts Frecuencia: 60 Hertz Sobre elevación de temperatura: 65°C sobre la del ambiente, con una media de 30°C y una máxima de 40°C Derivación a plena capacidad 2 arriba, 2 abajo de 2.5% c/u Altura de operación: 2000 m.s.n.m. Tipo de enfriamiento: Autoenfriamiento-OA Normas de fabricación: OM-J-116 y de acuerdo a las especificaciones de C.F.E. K-0000-01.



Transformador Monofásico, Clase 15 KV.  
de 13200-120/240 de 10 KVA

KVA	MODELO	KVA	MODELO
10	RMP1-10	37.5	RMP1-37.5
15	RMP1-15	50	RMP1-50
25	RMP1-25	75	RMP1-75
37.5	RMP1-37.5	100	RMP1-100

**Figura 38** Transformador comercial tipo poste monofasico de 10 KVA y tabla de modelos hasta 100 KVA

Diagrama Esquemático

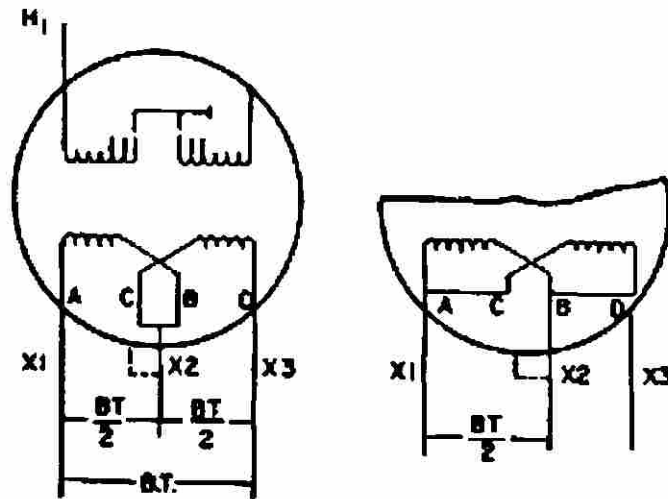
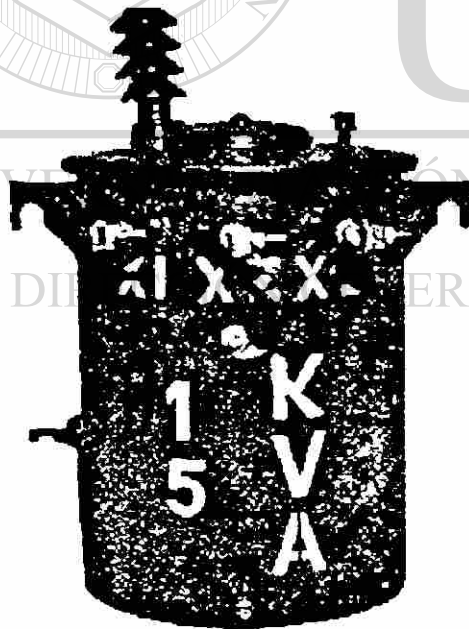


Figura 39 Diagrama esquemático del transformador comercial tipo poste monofasico de 10 KVA 13200/440-220 V

Especificaciones

Tensión primaria: 13,200YT/7620 Tensión Secundaria: 120/240 volts Frecuencia: 60 Hertz sobre-elevación de temperatura: 65°C sobre la del ambiente, con una media de 30°C y una máxima de 40°C Derivaciones a plena capacidad 2 arriba, 2 abajo de 2.5% c/u Altura de Operación: 2000 m.s.n.m. Tipo de Enfriamiento: Autoenfriado-OA Normas de Fabricación: NOM-J-116 y de acuerdo a las especificaciones de C.F.E. K-0000-01

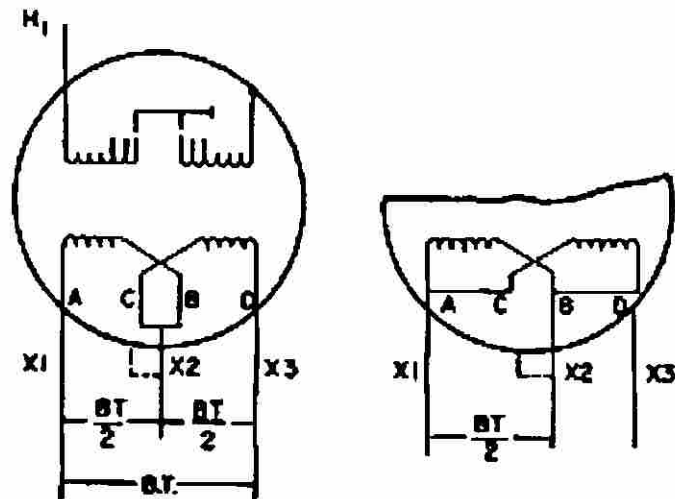


KVA	MODELO
15	RMPI-YT-15
25	RMPI-YT-25
37.5	RMPI-YT-37.5
50	RMPI-YT-50

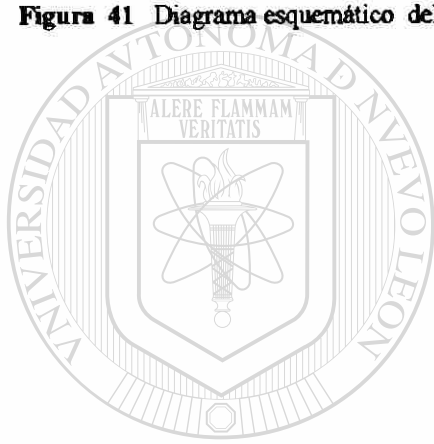
Transformador Monofásico, Clase 15 KV. de 13200YT/7620-120/240. 15 KVA

Figura 40 Transformador comercial tipo poste monofasico de 15 KVA y tabla de modelos hasta 50 KVA

## Diagrama Esquemático



**Figura 41** Diagrama esquemático del transformador comercial tipo poste monofasico de 15 KVA 13200YT/7620-120/240 V



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## 5. MOTORES DE INDUCCION MONOFASICOS

### 5.1 Introducción

En el hogar y talleres pequeños, la mayoría de los aparatos que usamos diariamente se encuentran contruidos con motores de inducción monofásicos de c.a. como por ejemplo las lavadoras, refrigeradores, aires lavados, abanicos de pedestal, bombas, relojes etc. Es por esto la gran importancia que tienen estos motores en nuestra vida diaria.

### 5.2 El Principio de Funcionamiento

Toman el nombre de motores de inducción, las maquinas de corriente alterna que verifican su movimiento de rotación por la influencia de la corriente y voltaje que se induce en el rotor.

Un motor de inducción monofásico, como su nombre lo indica, tiene un embobinado monofásico en el estator.

El principio en que se funda el motor monofásico de inducción es el de proveer al estator de dos devanados, que en la practica se denominan devanado principal y devanado auxiliar de arranque. En donde el devanado auxiliar solo se emplea para el arranque del motor y debe de ser desconectado cuando el motor alcance aproximadamente el 70% de la velocidad nominal.

### 5.3. Elementos Mecánicos del Motor de Inducción Monofásico

Los motores de caballos de potencia fraccionarios son usualmente monofásicos, y hay muchos tipos de dichos motores monofásicos. No obstante, los elementos mecánicos del motor de inducción monofásico son los mismos que los de inducción trifásico, excepto que se usa un interruptor centrífugo en ciertos tipos de motores monofásicos, para desconectar el arrollamiento que se usa para el arranque., el rotor del motor monofásico de inducción es usualmente del tipo de jaula de ardilla

### 5.4. Partes Principales del Motor de Inducción

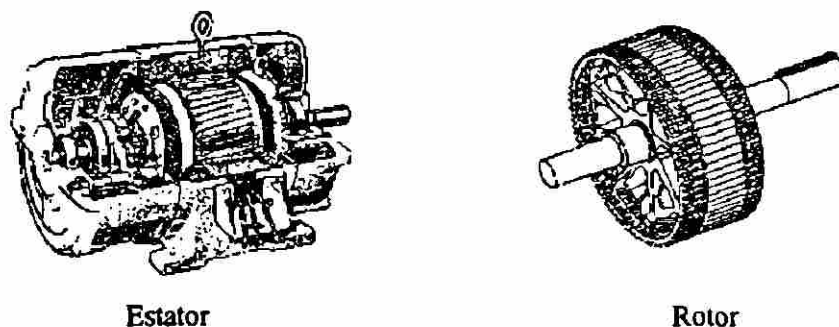
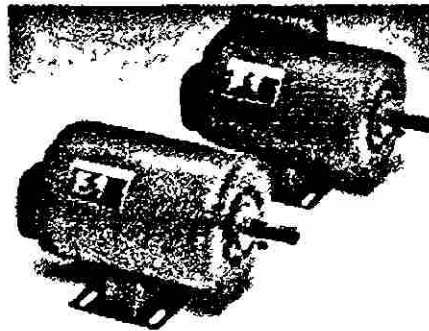


Figura 42 Partes principales del motor de inducción

**Estator.-** Es la parte fija del motor y sirve de sustento, además de proporcionar el camino para el flujo magnético. Aquí se encuentran alojados los devanados de arranque y principal.

**Rotor Jaula de Ardilla.-** Es la parte móvil del motor y esta compuesto una serie de barras conductoras colocadas dentro unas ranuras hechas en la superficie del rotor con los extremos puesto en corto circuito por medio de anillos. Toma este nombre ya que se asemeja a las jaulas para ardillas o ratas domesticas.



**Figura 43** Tipos de motores monofásicos (motor monofásico de inducción y con condensador de arranque)

## 5.5 El Concepto de Deslizamiento del Rotor

El voltaje inducido en la barra de un motor de inducción depende de la velocidad del rotor con respecto al campo magnético el cual motor depende del voltaje y las corrientes del rotor, para definirlo mas comúnmente “velocidad de deslizamiento” el cual se define como diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor.

$$n_{des} = n_s - n_R$$

$n_{des}$  = Velocidad de desplazamiento de la maquina

$n_s$  = Velocidad del campo magnético (sincronica)

$n_R$  = Velocidad mecánica del rotor

Deslizamiento relativo expresado en porcentaje

$$s = \frac{n_{des}}{n_s} (x100\%)$$

$$s = \left( \frac{n_s - n_R}{n_s} \right) (x100\%)$$

En donde la velocidad sincrónica se calcula como:

$$n_s = \frac{120f}{p}$$

## 5.6 Los Devanados de Trabajo y de Arranque Auxiliar

Los cuales se encuentran dentro del estator defasados entre sí un ángulo de 90 grados con el objeto de que la corriente se desplace los mismo 90 grados con la relación de uno a otro devanado.

## 5.7 Arranque de Los Motores Monofasicos de Inducción

Con el rotor estacionario, si se aplica un voltaje monofásico al estator, se encuentra que el rotor no gira. Sin embargo, si recibe de algún modo un par inicial y se hace girar, empieza a caminar y continúa su giro. También se encuentra que el rotor puede girar en cualquier dirección tan solo cambiando la dirección del par inicial. De estas observaciones parecerá que el motor de inducción monofásico no desarrolla ningún par estando parado y consecuentemente no tiene un arranque propio, sin embargo, una vez que la rotación se ha iniciado desarrolla un par que lo mantiene girando.

Se tiene entendido que los motores monofasicos no cuentan con arranque intrínseco, los motores se califican según el arranque que tengan, los tipos de arranque son los siguientes:

1. -Devanado de fase partida
2. -Devanado con condensador
3. -Estator con polos sombreados

## 5.8 El Motor De Fase Partida

El devanado de arranque cuenta con dos tipos de devanados el de trabajo y el de arranque auxiliar, los cuales están colocados a 90 grados eléctricos entre sí, el devanado de arranque auxiliar que se desconecta por medio de un interruptor centrifugo, el cual se desconectara a la velocidad especificada a que a sido diseñado el dispositivo ver el circuito en la figura 44.

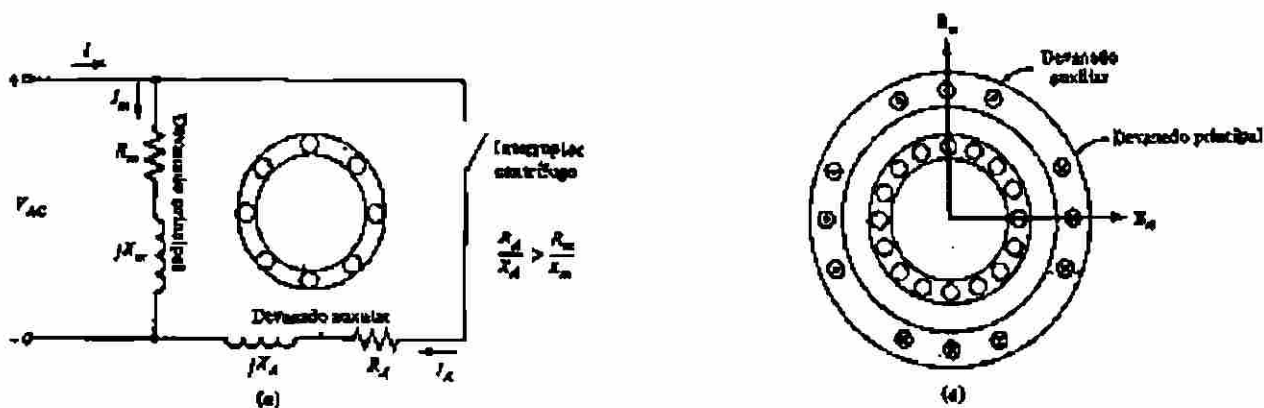


Figura 44 Diagrama de un motor de inducción fase partida

el devanado auxiliar de arranque se debe de diseñar con mas resistencia que el de devanado de trabajo con él propósito de que la corriente del devanado auxiliar de arranque deba de estar adelantada con respecto al del devanado de trabajo, esto se logra usando un alambre de menos sección y de menor calibre el cual se usa solo, para el arranque, el capacitor usado es electrolítico, que es relativamente barato.

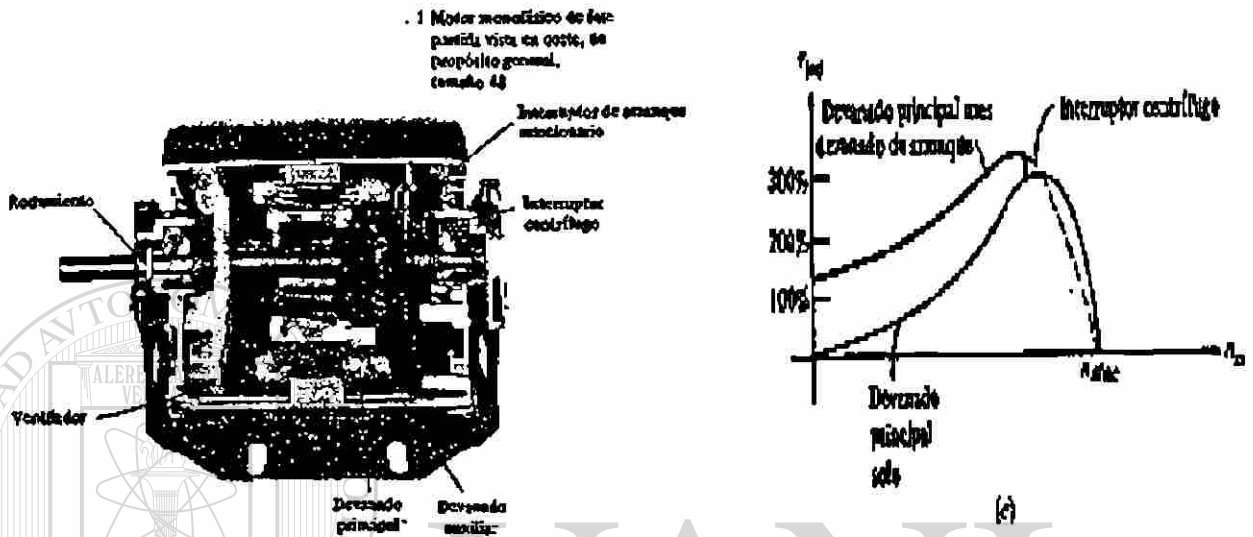


Figura 45 Curva par-velocidad de un motor de inducción fase partida

La rotación del motor se puede determinar según como este colocado los campos magnéticos del devanado auxiliar si esta adelantado 90 grados adelante o atrás del devanado del trabajo el cual este se realiza intercambiando las conexiones en el devanado auxiliar de arranque y el devanado de trabajo permanezca sin cambio.

## 5.9 Motores con Condesadores de Arranque

El arranque con condensador se refiere a que se le coloca un condensador en el devanado auxiliar en serie con este ver la figura 9, el cual puede igualar el desarrollo de las fuerzas magnetomotriz de la corrientes en ambos devanados y con esto se puede adelantar al devanado auxiliar de arranque 90 grados del devanado de trabajo en sus corrientes el cual se genera un campo magnético simple uniforme y giratorio que se tendrá un comportamiento similar al de un motor que estuviera alimentado de una fuente trifasica, en el cual los pares de arranque son muy altos ver figura 10 y por lo mismo son muy costosos.

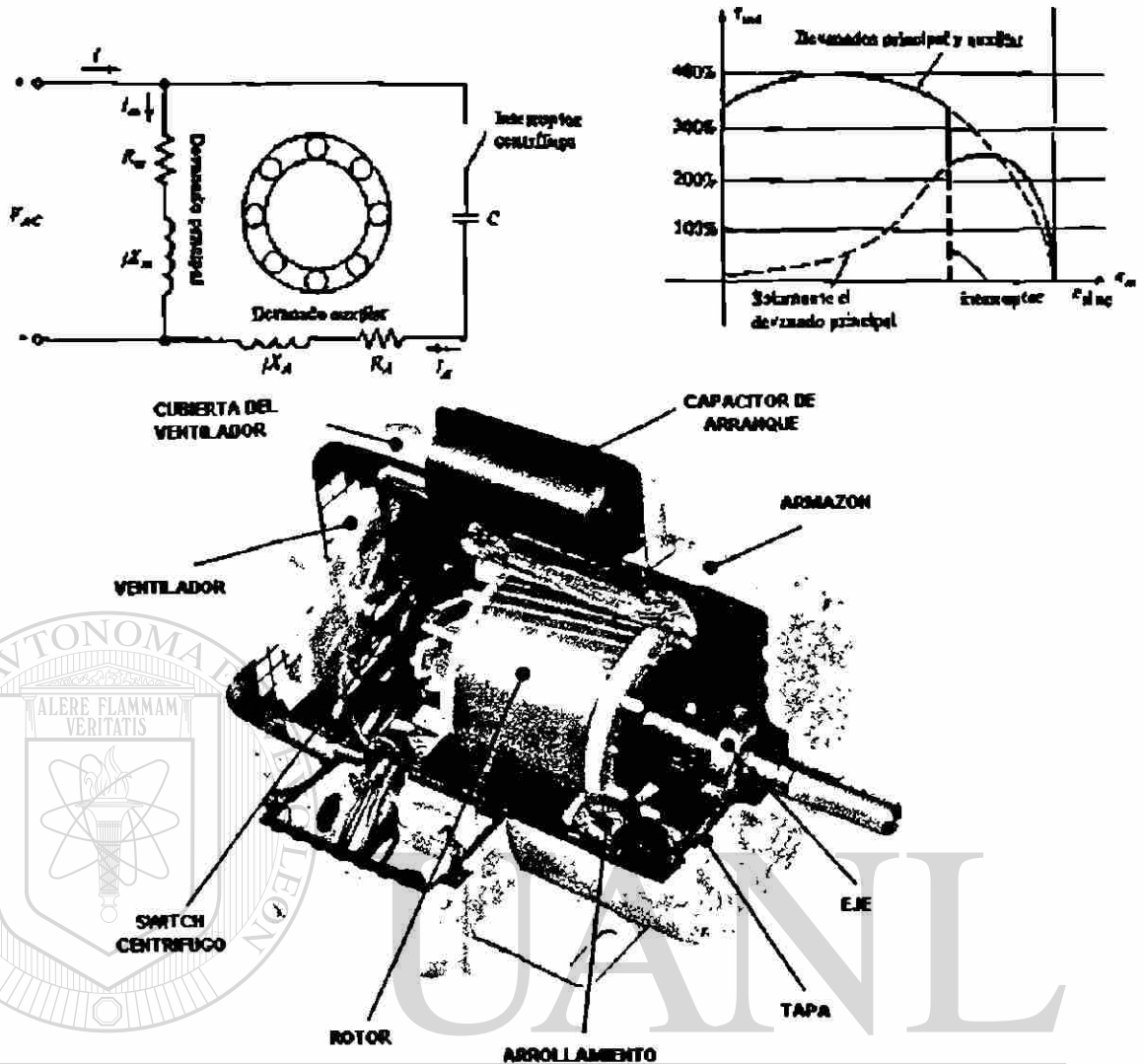


Figura 46 Diagrama Electrico, curva par-velocidad y fotografia de un motor de inducción con capacitor de arranque

110 volts.			
Potencia	Capacitor	Par de Arranque en función del par nominal	Velocidad del motor
1/8 de HP.	70-90 μF.	350 a 400%	n = 3 450 rpm.
1/4 de HP.	120-150 μF.	400 a 475%	n = 1 725 rpm.
1/2 de HP.	230-280 μF.	285 a 390%	n = 1 140 rpm.
1 HP.	340-410μF.		

Tabla 8 Relación de potencia contra el capacitor usado

## 5.10 Motores con Condensador Permante

En este tipo de motores el arrollamiento de arranque y el condensador están diseñados para funcionamiento permanente, proporcionando un motor bifásico desequilibrado. Para un funcionamiento satisfactorio en marcha se necesita únicamente una pequeña capacidad. Por ejemplo, para 110 volts el condensador de un motor de  $\frac{1}{20}$  de HP es 3  $\mu\text{f}$ ., de un motor de  $\frac{1}{8}$  de HP 8  $\mu\text{f}$ ., de un motor de  $\frac{1}{2}$  HP 15  $\mu\text{f}$ . Esta es mucho menor que la capacidad necesaria para alto par motor de arranque (véase "Motor de condensador de arranque"). No obstante, el motor de fase auxiliar con condensador permanente utiliza el mismo condensador para el arranque y la marcha y, por lo tanto, tiene un par motor de arranque pequeño de alrededor de 35 a 50% del par motor nominal, ya que el condensador electrolítico no puede utilizarse para funcionamiento continuo, debe utilizarse para este tipo de motor el condensador de papel de plomo aislado con aceite o pyranol más caro.

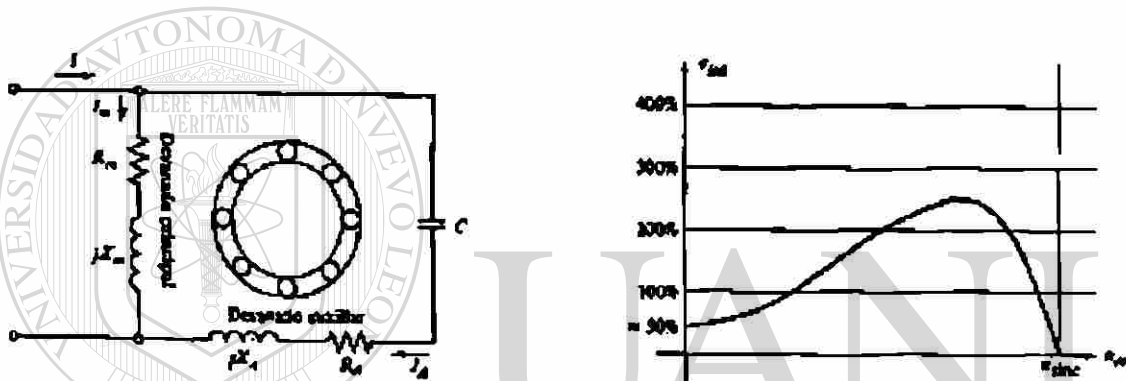


Figura 47 Diagrama eléctrico y curva par-velocidad de un motor de inducción con capacitor permanente

## 5.11 Motor con Condensador de Arranque y Permanente.

Para que el motor bifásico sea capaz de desarrollar un alto par de arranque y que al mismo tiempo tenga un funcionamiento satisfactorio en marcha, es necesario utilizar valores diferentes de capacidad para el arranque y la marcha. Esto puede llevarse a cabo ya sea utilizando dos condensadores, un condensador electrolítico para el arranque y un condensador de aceite para la marcha, o bien utilizando un simple condensador de aceite en conexión con un autotransformador.

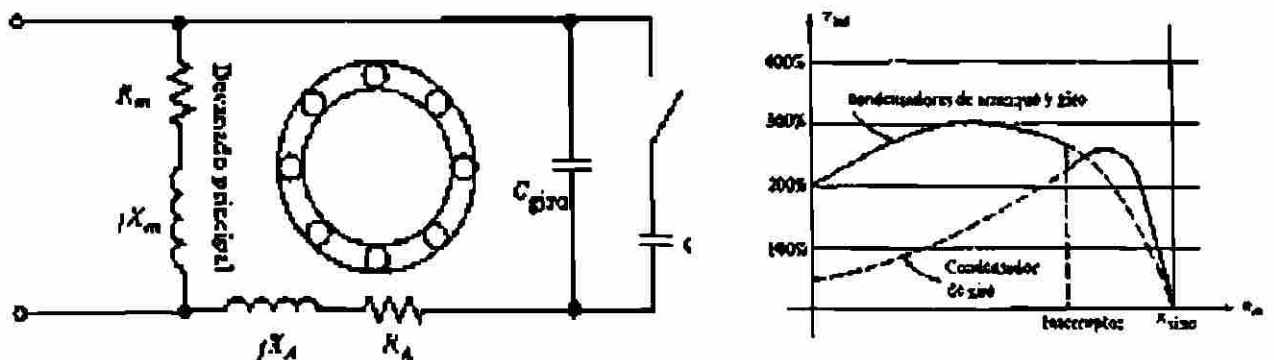


Figura 48 Diagrama eléctrico y curva par-velocidad de un motor de inducción con capacitor de arranque y permanente

El motor de fase auxiliar con condensador permanente y el motor con condensador de arranque y permanente ofrecen ventajas en comparación con el motor de fase auxiliar y el motor con condensador de arranque, que son motores monofásicos puros. Los últimos motores producen un par motor pulsante en vibración y ruido. Los motores de fase auxiliar con condensador permanente y el motor con condensador de arranque y permanente desarrollan un par motor más uniforme y son, por lo tanto, más silenciosos que los motores monofásicos puros.

## 5.12 Motores de Polos Sombreados

Los motores de los polos sombreados son muy diferentes a los motores que tienen un devanado auxiliar de arranque con condensador, este motor tiene un devanado principal que tiene dos polos salientes lo cual los rodea una bobina en cortocircuitada llamada bobina sombreada.

El cual el devanado principal con su bobina sombreada cortocircuitada ver figura 13a, producen un flujo en los polos variante con el tiempo y cuando esto sucede induce en la bobina sombreada, un voltaje y una corriente que se opone al cambio del flujo original, el cual produce un ligero desbalance entre los dos campos magnéticos del estator que gira en dirección opuesta la cual la dirección va a lado del polo a que no esta sombreada a la que esta sombreada, en cambio en par velocidad se muestra en la gráfica de polo sombreado en la figura 13b.

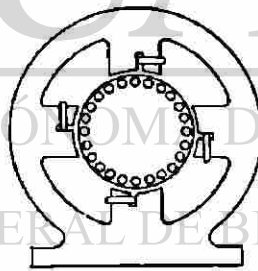


Fig. 28-7. Motor

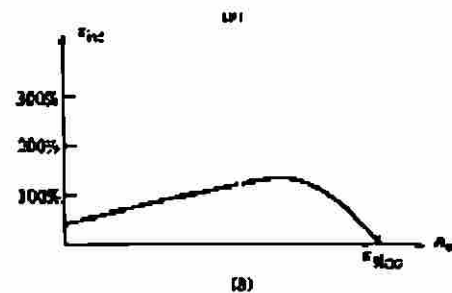
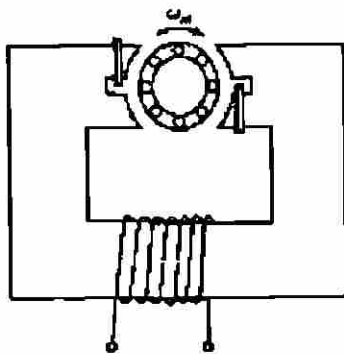


Figura 49 Diagrama esquemático y curva par-velocidad de un motor de inducción polos sombreados

Estos motores desarrollan muy poco caballaje y su sistema de arranque es muy bajo y en el intercambio de dirección del rotor al momento de girar es difícil solo poniendo dos bobinas sombreadas en cada cara polar.

Clasificación de los motores monofásicos de inducción del mejor al peor en arranque.

1. Motor de condensador de arranque, condensador de giro (permanente)
2. Motor de condensador de arranque
3. Motor de condensador permanente
4. Motor de fase partida
5. Motor de polos sombreados

### 5.13 Control de Velocidad en Los Motores Monofásicos de Inducción

En el control de velocidad de los motores monofásicos de inducción se dispone de las siguientes técnicas para jaula de ardilla.

1. -Variar la frecuencia de la corriente en el estator
  2. -Aumentar o disminuir el número de polos
  3. -Cambiar de voltaje aplicado en las terminales  $v_t$
- En la variación de la frecuencia del voltaje se pueden implementar circuitos con *scrs* o *triacs* para reducir el control de la fase de la cual este método corta la onda de la corriente alterna. Los controles de estado sólido son más baratos que un autotransformador.
- 
- La inserción de resistencia en el estator del motor es de los métodos más baratos de control de voltaje, pero la desventaja es que pierde potencia considerable en la resistencia
  - El control de velocidad por medio del voltaje por medio de autotransformadores que ajustan el voltaje continuamente.



## 6. MOTORES DE INDUCCION TRIFASICOS

### 6.1 Introducción

La relación entre el magnetismo y la electricidad fue descubierta en 1819 cuando, en la demostración de una clase, el científico danés Hans Oersted encontró que la corriente eléctrica que circula por un alambre desvía la aguja de una brújula cercana. Poco tiempo después, André Ampere obtuvo las leyes cuantitativas de la fuerza magnética entre conductores que llevan corrientes eléctricas.

En la década de 1820, se demostraron varias conexiones entre la electricidad y el magnetismo por Faraday e independientemente por Joseph Henry. Ellos comprobaron que se podía producir una corriente eléctrica en un circuito al mover un imán cercano al circuito o bien variando la corriente de un circuito cercano al primero, estas observaciones demuestran que un cambio en el campo magnético produce un campo eléctrico. Años después, el trabajo teórico realizado por Maxwell mostró que un campo eléctrico variable da lugar a un campo magnético.

Como la mayor parte de la corriente eléctrica producida hoy en día es alterna, los motores que se diseñan para c.a. son muchos. Los motores de c.a. son ideales para trabajar a velocidad constante, porque en ellos la velocidad está determinada por la frecuencia de la c.a. aplicada a las terminales de los mismos. También se hacen motores de c.a. de velocidad variable pero dentro de ciertos límites.

El motor de inducción es el más comúnmente empleado en corriente alterna debido a su sencillez, a su construcción sólida y a su bajo costo de mantenimiento. Estas características del motor de inducción se deben al hecho de que el rotor es independiente y no está conectado con la fuente externa de tensión. El motor de inducción se llama así por el hecho de que el campo magnético giratorio del estator induce corrientes alternas en el circuito del rotor. Un motor de inducción se distingue porque no necesita corriente de excitación de c.c. en el rotor para funcionar.

### 6.2 Leyes Fundamentales.

#### Ley de Ampere.

La ley de Ampere establece que la integral de línea de  $B \cdot ds$  alrededor de cualquier trayectoria cerrada es igual a  $\mu_0 I$ , donde  $I$  es la corriente estable total que pasa a través de cualquier superficie limitada por la trayectoria cerrada.

$$\int B \cdot ds = \mu_0 I$$

donde  $\mu_0$  es la permeabilidad del espacio libre y tiene un valor igual a  $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A}\cdot\text{m}$

#### Ley de Inducción de Faraday.

La fem inducida en un circuito es directamente proporcional a la rapidez de cambio del flujo magnético a través del circuito.

$$E = -N \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

### 6.3 Construcción del Motor de Inducción

Un motor de inducción tiene un estator igual al de una máquina síncrona pero su rotor tiene una construcción diferente. En la figura 50 se muestra el estator de una máquina de dos polos. Hay dos tipos diferentes de rotores para motores de inducción. Uno se conoce como *rotor de jaula de ardilla* o simplemente *rotor de jaula* y el otro como *rotor devanado*.

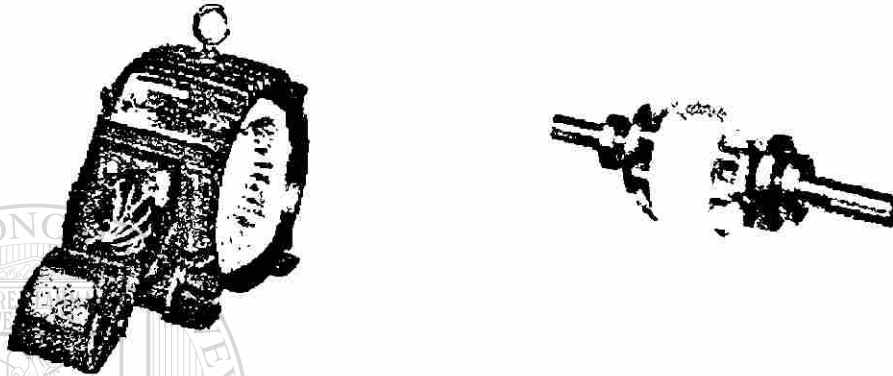


Figura 50 Estator de un motor de inducción con sus devanados y rotor jaula de ardilla

Un rotor de jaula de ardilla consiste en una serie de barras conductoras colocadas dentro de unas ranuras hechas en la superficie del rotor con sus extremos puestos en cortocircuito por medio de anillos. Este diseño se le conoce como rotor de jaula de ardilla porque sus conductores tienen la apariencia de las jaulas en donde juegan las ardillas o las marmotas.

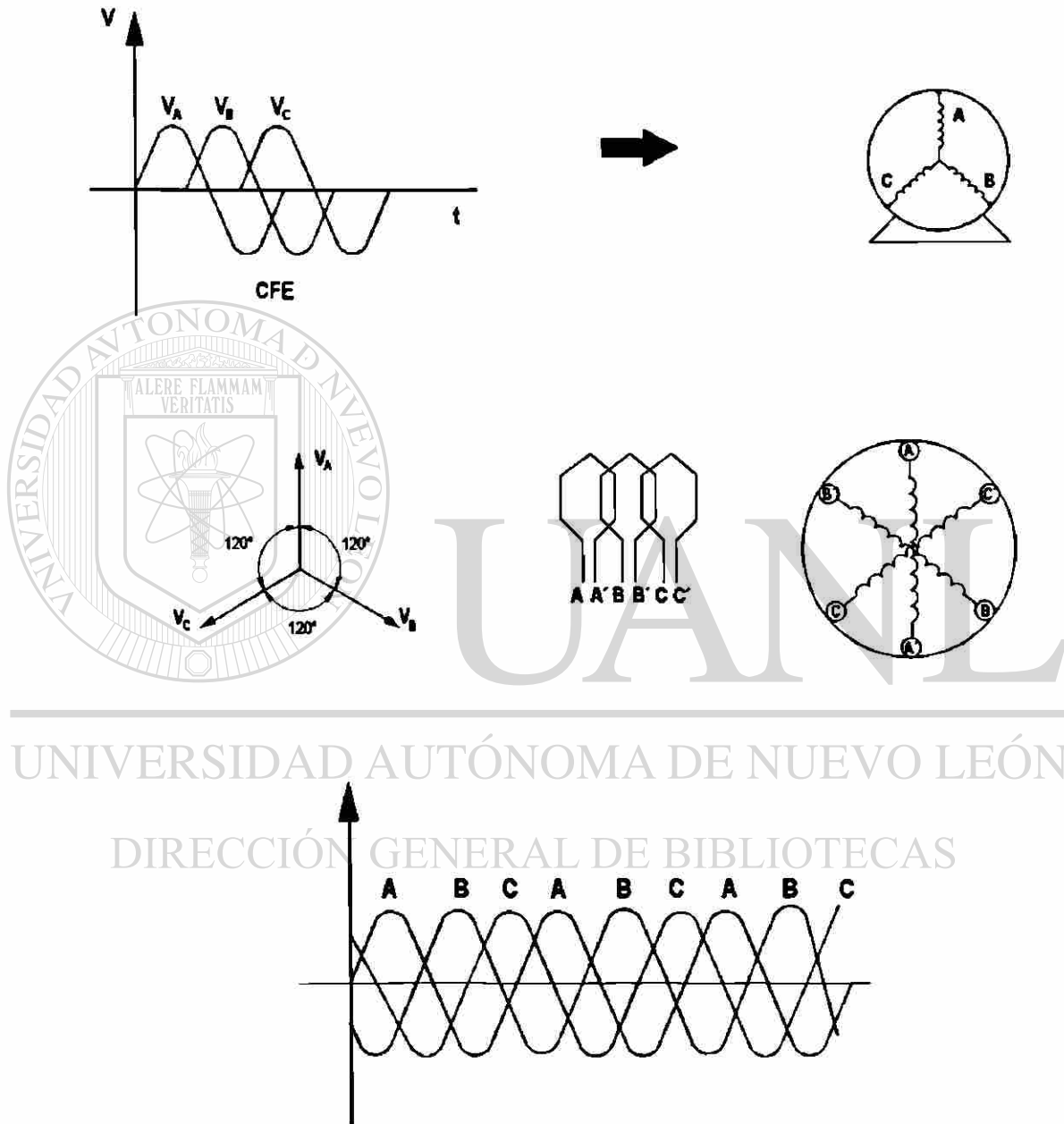
El otro tipo de rotor es el denominado de rotor devanado, que tiene un arrollamiento trifásico completo que es una imagen reflejada del devanado del estator. Las tres fases del arrollamiento de este rotor usualmente se conectan en Y y sus extremos se conectan a unos anillos rozantes montados en el eje. Los devanados del rotor se pueden poner en cortocircuito a través de un conjunto de escobillas que están en contacto con los anillos rozantes. También se pueden insertar resistencias exteriores en el circuito del rotor, ya que los motores de inducción de rotor devanado se tiene acceso a las corrientes del rotor a través de las escobillas, este tipo de motor es muy utilizado donde se requiere control de velocidad.

### 6.4 El Campo Magnético Giratorio.

Antes de aprender como el campo magnético rotatorio hace que el motor gire, primero se debe saber como se produce este campo. En el esquema aparece un estator trifásico al cual se le aplica una corriente alterna proveniente de una fuente trifásica.

Los dos bobinados de cada fase están devanados en el mismo sentido. En todo instante el campo magnético producido por una de las fases en particular depende de la intensidad de corriente en esa fase. Si la intensidad es cero, el campo magnético también será cero. Si la intensidad es máxima, el campo magnético tendrá una fuerza máxima. Como las intensidades

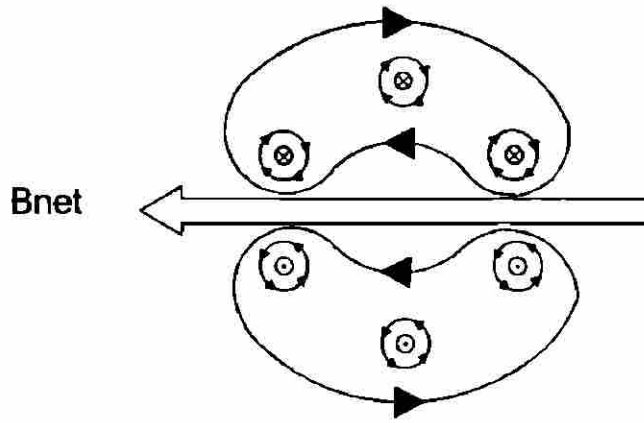
de los tres bobinados tienen una diferencia de fase de  $120^\circ$ . los tres campos magnéticos existentes en un instante dado se combinan para producir un solo campo que acciona sobre el rotor. En la figura que se muestra a continuación se verá que de un instante al siguiente, los campos magnéticos se combinan para producir un campo magnético resultante cuya posición varía un cierto ángulo. Al completarse un ciclo de c.a. el campo magnético se habrá desplazado  $360^\circ$ , o sea una revolución.



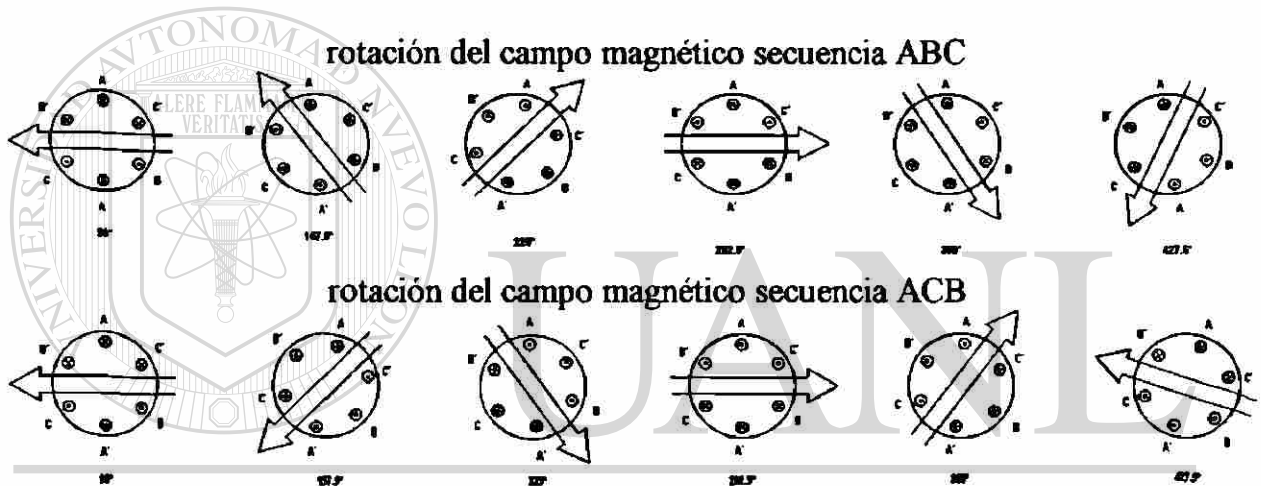
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®



**Figura 51** Sistema de voltajes trifásicos producido por C.F.E., devanado de motor trifásico y campo magnético Bnet producido por los conductores



**Figura 52** Dirección de rotación del campo Bnet para secuencia de fase ABC y ACB

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Con esto se llega a la conclusión de que, aplicando CA trifásica a tres bobinas distribuidas simétricamente en torno al estator, se produce un campo magnético giratorio.

### 6.5 El Concepto de Deslizamiento del Rotor

El voltaje inducido en una barra del rotor de un motor de inducción depende de la velocidad relativa del rotor con respecto al campo magnético. Puesto que el comportamiento del motor de inducción depende de los voltajes y las corrientes del rotor, resulta más lógico hablar de esta velocidad relativa. Para definirla se utilizan comúnmente dos términos. Uno de ellos es la velocidad de deslizamiento, que se define como la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor:

$$n_{des} = n_s - n_R$$

$n_{des}$  = Velocidad de desplazamiento de la maquina  
 $n_s$  = Velocidad del campo magnético (sincrónica)  
 $n_R$  = Velocidad mecánica del rotor

El otro término que se utiliza para describir el movimiento relativo es el deslizamiento, que corresponde a la velocidad relativa expresada en por unidad o en porcentaje. Es decir, el deslizamiento se define como:

$$s = \frac{n_{des}}{n_s} (x100\%) \qquad s = \left( \frac{n_s - n_R}{n_s} \right) (x100\%)$$

Esta ecuación también se puede expresar en términos de velocidad angular (radianes por segundo) como:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_R}{\omega_s} (x100\%)$$

Se puede ver que, si el rotor gira a velocidad sincrónica,  $s=0$ ; y si el rotor esta quieto,  $s=1$ . Todas las velocidades normales del motor están comprendidas entre estos dos límites. Es posible expresar la velocidad mecánica del eje del rotor en función de la velocidad sincrónica y el deslizamiento.

$$n_R = (1 - s)n_s$$

## 6.6 Frecuencia Eléctrica del Motor

Un motor de inducción trabaja con base en voltajes inducidos en el rotor y por esta razón en algunas oportunidades se le ha llamado transformador giratorio. Lo mismo que un transformador, el primario (estator) induce un voltaje en el secundario (rotor), pero a diferencia del transformador, la frecuencia en el secundario no es necesariamente la misma frecuencia que hay en el primario.

Si se bloquea el rotor del motor de tal manera que no se pueda mover, entonces su frecuencia será igual a la del estator, en otro caso, si el rotor gira a velocidad sincrónica, su frecuencia será cero.

A  $n_R = 0$  rpm, la frecuencia del rotor es  $f_R = f_e$ , y el deslizamiento es  $s = 1$ .

A  $n_R = n_s$ , la frecuencia es  $f_R = 0$  y el deslizamiento es  $s = 0$ .

Para una velocidad intermedia entre estas dos.

$$f_R = sf_e$$

Existen diferentes formas de esta expresión, todas ellas utilizables.

$$f_R = \frac{n_s - n_R}{n_s} (f_e) \qquad f_R = \frac{p}{120} (n_s - n_R)$$

## 6.7 Circuito Equivalente del Motor Trifásico

El motor de inducción necesita para su operación que el circuito del estator induzca voltajes en el circuito del rotor (acción transformadora) para que en éste haya corrientes, puesto que la inducción de voltajes en el circuito del rotor de un motor de inducción es, esencialmente, una operación de transformación, el circuito equivalente de un motor de inducción deberá ser muy similar al circuito equivalente de un transformador. Se dice que un motor de inducción es una máquina sencillamente excitada (en oposición a los motores sincrónicos que son máquinas doblemente excitadas), ya que se le suministra potencia solamente por un punto. Debido a que el motor de inducción no tiene un circuito de excitación independiente, su modelo no tiene fuentes de voltaje interno como el voltaje generado  $E_A$  de las máquinas sincrónicas.

Con base en el conocimiento de los transformadores y teniendo en cuenta que ya se sabe que la frecuencia del rotor varía con la velocidad del motor, es posible deducir el circuito equivalente de un motor de inducción. Se desarrollará el modelo del motor de inducción partiendo del modelo del transformador, y luego buscando la manera de tener en cuenta la frecuencia variable del rotor y otros efectos similares del motor de inducción.

## 6.8 El Motor de Inducción como Transformador

En la figura se muestra el circuito equivalente por fase de un transformador que representa la operación de un motor de inducción.

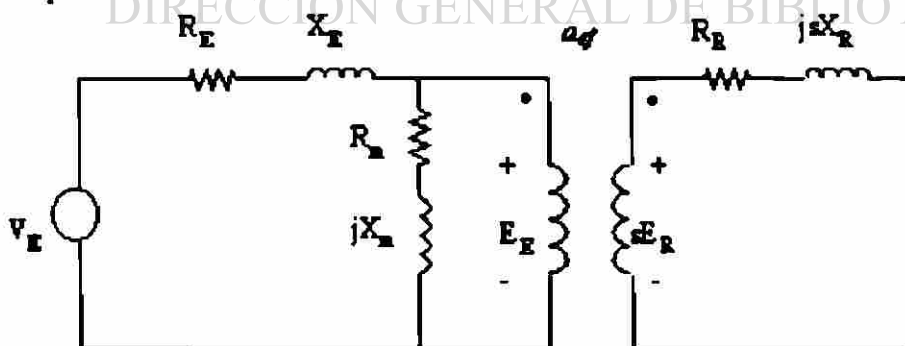


Figura 53 Modelo del motor como transformador giratorio

Como en cualquier transformador, existe una resistencia y una autoinductancia en el devanado primario (estator) que deben representarse en el circuito equivalente de la máquina. La resistencia del estator se llamará  $R_E$  y su reactancia se denominará  $X_E$ . Estas dos componentes aparecen a la derecha de la entrada en el modelo de la máquina.

Nuevamente, como en cualquier transformador con un núcleo de hierro, el flujo en la máquina está relacionado con la integral del voltaje aplicado  $E_m$ . La curva del flujo en función

(curva de magnetización) de la máquina, se presenta en la figura 54., comparada con la curva similar de un transformador de potencia. Se observa que la pendiente de la curva correspondiente al motor de inducción es mucho menos inclinada que la de un buen transformador. Esto se debe a la existencia del entrehierro en el motor de inducción que hace aumentar demasiado la reluctancia de la trayectoria del flujo con lo cual se debilita el acoplamiento en los devanados primario y secundario.

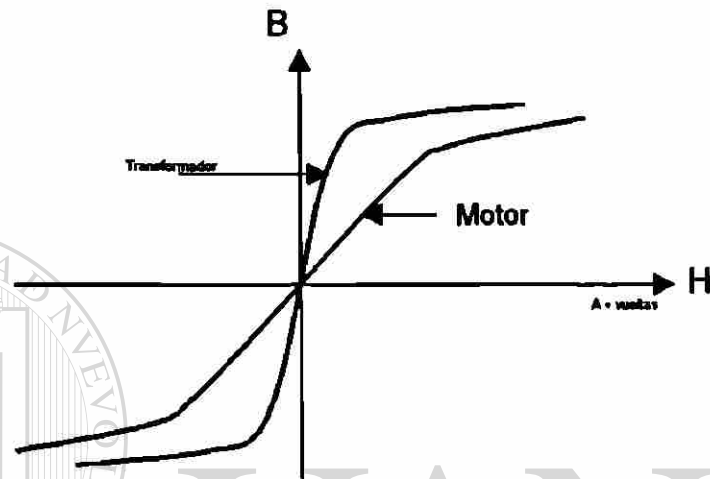


Figura 54 Curva B-H comparativa entre un motor y un transformador

Con el aumento de la reluctancia a causa del entrehierro se necesita una mayor corriente de magnetización para obtener un determinado nivel de flujo. Entonces, en el circuito equivalente, la reactancia de magnetización  $X_m$  tendrá un valor mucho menor que el correspondiente valor ordinario.

El voltaje interno  $E_m$  del primario (estator) está acoplado con el voltaje interno  $E_R$  del secundario (rotor), por un transformador ideal con una relación  $a_{ef}$  entre espiras efectivas. Es claro que esta relación se puede determinar fácilmente para un motor de rotor devanado, pues básicamente es la relación entre el número de conductores por fase en el estator y el número de conductores por fase en el rotor modificados ambos por sus correspondientes factores de paso y de distribución. Es mucho más difícil definir con exactitud  $a_{ef}$  en el caso de un motor con rotor de jaula de ardilla, ya que en él no hay devanados tan perfectamente definidos. De todas maneras, existe una relación de transformación para el motor.

El voltaje  $E_R$  inducido en el rotor produce un flujo de corriente en el circuito del rotor (secundario) de la máquina, el cual se encuentra en corto circuito, la impedancia del primario y la corriente de magnetización del circuito equivalente de un motor de inducción son muy similares a los valores correspondientes del modelo de circuito equivalente de un transformador. La diferencia fundamental entre los circuitos equivalentes de un motor de inducción y de un transformador se debe a los efectos que la frecuencia variable del rotor produce en el voltaje inducido  $E_R$  y en la impedancia  $R_R$  y  $jX_R$  del rotor.

## 6.9 Modelo del Circuito del Rotor.

Cuando se aplica un voltaje a los devanados del estator de un motor de inducción, se induce un voltaje en los devanados del rotor de la máquina. En general a mayor velocidad relativa entre el rotor y el campo magnético del estator, mayor será el voltaje resultante en el rotor. La mayor velocidad relativa ocurre cuando el rotor está quieto, condición conocida como rotor frenado o rotor bloqueado. Si el voltaje inducido en el rotor en esa condición se le llama  $E_{RO}$ , entonces el voltaje inducido a un deslizamiento cualquiera estará dado por la ecuación

$$E_R = sE_{RO}$$

De lo esta fórmula podemos deducir lo siguiente

Condición	$N_R$	$s$	$E_R$
Rotor bloqueado	0	1	$E_{RO}$
Rotor gira en vacío	$\approx n_s$	$\approx 0$	0

Tabla 9 Deslizamiento del motor en función de la velocidad

La reactancia de un motor de inducción depende de la inductancia propia del rotor y de la frecuencia del voltaje y la corriente que existan en el. Con una inductancia del rotor igual a  $L_R$ , la reactancia estará dada por

$$X_R = \omega L_R = 2\pi f L_R = sX_{RO}$$

En la figura 55 se muestra el circuito equivalente resultante para el rotor. La corriente en el mismo se puede encontrar así.

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R}$$

$$I_R = \frac{sE_{RO}}{R_R + jsX_{RO}}$$

Si el numerador y el denominador se multiplican por  $(1/s)$

$$I_R = \frac{E_R}{\frac{R_R}{s} + jX_{RO}}$$



Para representar la carga aplicada en la flecha del rotor el circuito equivalente se expresa de la siguiente manera:

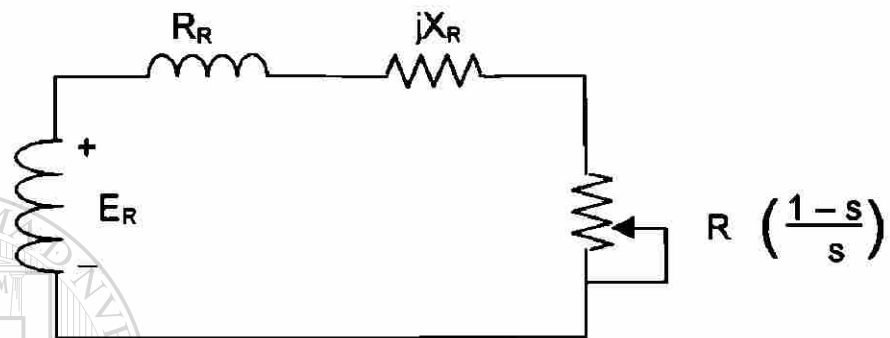


Figura 55 Modelo de parámetros del rotor

## 6.10 Circuito Equivalente de Parámetros

En el circuito del motor de inducción se puede hacer algo similar a lo efectuado en el transformador: los voltajes corrientes e impedancias del lado del secundario se pueden referir al lado del primario por medio de la relación de espiras. De esta manera el modelo equivalente de un motor de inducción trifásico quedaría de la manera siguiente:

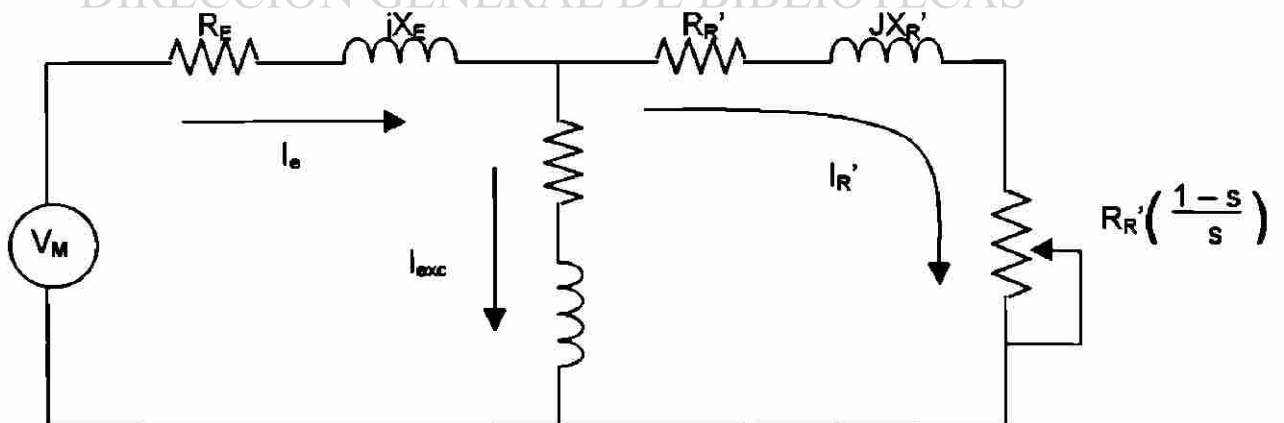


Figura 56 Modelo equivalente de parámetros

## 6.11 Determinación de Parámetros del Motor de Inducción.

Para calcular todos los parámetros del modelo del motor de inducción que se vio en la sección anterior se realizan dos tipos de pruebas:

- a) La prueba de vacío.
- b) La prueba de rotor bloqueado.

**Prueba de vacío.**

Con esta prueba se obtienen los valores de  $R_M$  y  $X_M$  (rama de excitación), la prueba se realiza aplicando el voltaje nominal al rotor y estando en vacío (la flecha deberá estar liberada de toda carga mecánica).

Se miden los valores de corriente en vacío y de potencia en vacío.

**Prueba de rotor bloqueado.**

Para esta prueba existen dos modalidades. Una es la prueba de rotor bloqueado a tensión plena y la otra es la prueba de rotor bloqueado a tensión reducida.

**Prueba de rotor bloqueado a tensión plena.**

Esta prueba sirve para determinar las reactancias saturadas, es decir, el modelo de arranque del motor. Los datos a obtener son: la corriente y la potencia del motor cuando este está frenado y con la tensión de línea nominal.

**Prueba de rotor bloqueado a tensión reducida.**

Esta prueba sirve para determinar las reactancias no saturadas, es decir, el modelo de marcha del motor. Las condiciones para esta prueba son:

- 1.- El rotor debe estar bloqueado.
- 2.- Hay que obligar al motor a que tome su corriente nominal.

En ambas pruebas se determinan  $R_E$ ,  $R_R'$ ,  $X_E$  y  $X_R'$ , de cada uno de los modelos (arranque y marcha).

## 6.12 Potencia en Motores de Inducción.

Un motor de inducción se puede describir, tal como se mencionó anteriormente, como un transformador giratorio. Su entrada es un sistema trifásico de voltajes y corrientes. Para un transformador ordinario la salida es potencia eléctrica a través del devanado secundario. El devanado secundario de un motor de inducción (el rotor) está en corto circuito, de manera que no existe potencia eléctrica a la salida de un motor de inducción. Su salida, en cambio, es mecánica. La relación entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica de salida se ilustra en el diagrama de la figura 57.

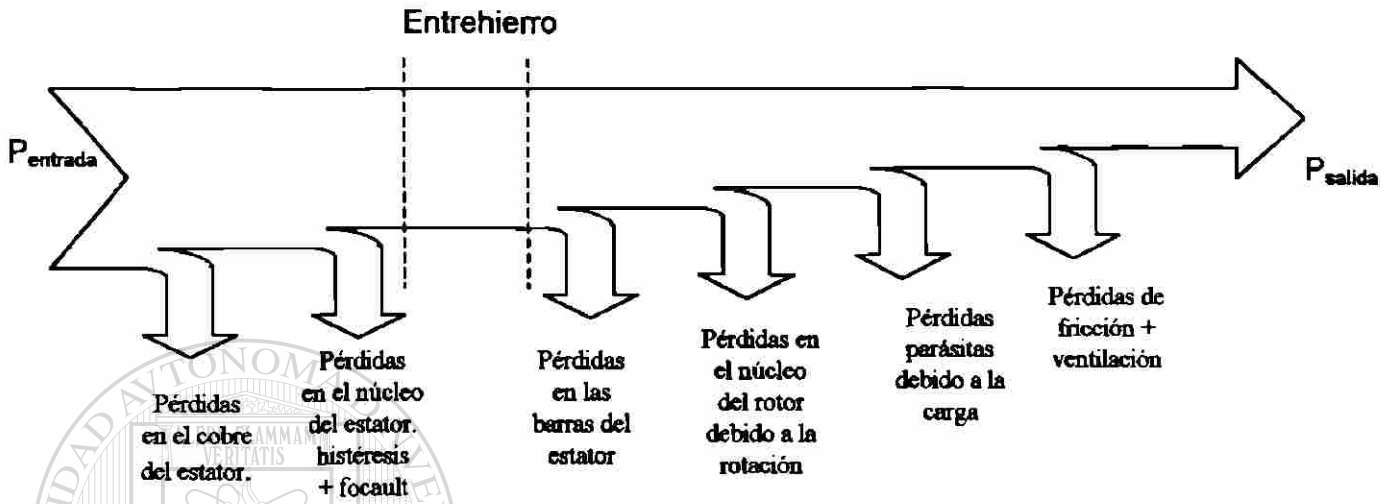


Figura 57 Diagrama de potencias en un motor de inducción

Lo anterior lo podemos expresar mediante la siguiente fórmula:

$$P_{salida} = P_{entrada} - P_{perdidas}$$

$$P_{salida} = P_{entrada} - P_{cobre} - P_{h+f} - P_{rotor} - P_{par} - P_{f+v}$$

Donde:

$$P_{cobre} = mI_c^2 R_e \quad (\text{Pérdidas por efecto Joule})$$

$$P_{rotor} = mI_R^2 R_R$$

La potencia que se convierte en mecánica en un motor de inducción es igual a:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega$$

### 6.13 Producción de Par en un Motor de Inducción

Si a un motor de inducción de jaula de ardilla, se le aplica al estator un sistema trifásico de voltajes, por sus devanados circula un sistema trifásico de corrientes. Estas corrientes producen un campo magnético  $B_{net}$ . La velocidad de rotación de este campo magnético está

$$n_s = \frac{120 f}{p}$$

dada por

donde  $f$  es la frecuencia del sistema de alimentación en hertz, y  $P$  es el numero de polos de la máquina, este campo magnético alcanza las barras del rotor e induce voltaje en ellas.

El voltaje inducido en las barras de un rotor determinado, esta dado por la ecuación:

$$e_{ind} = (v \times B)L$$

En donde:  $v$  = velocidad relativa de las barras del rotor con respecto al campo magnético.

$B$  = densidad de flujo magnético en el estator

$L$  = longitud de una barra del rotor

El par producido desde un punto de vista físico, que mantiene el rotor en movimiento, esta dado por la ecuación:

$$\tau_{ind} = k B_r \times B_{net}$$

Su magnitud está dada por:

$$\tau_{ind} = k B_r B_{net} \text{ sen } \delta$$

En donde:

$B_r$ . El campo magnético del rotor es directamente proporcional a la corriente del rotor, mientras que éste no esté saturado. La corriente del rotor aumenta si crece el deslizamiento, (desciende la velocidad).

$B_{net}$ . El campo magnético neto en el motor es proporcional a el voltaje aplicado al motor y por lo tanto es aproximadamente constante.

$\text{Sen } \delta$ . el ángulo  $\delta$  entre el campo magnético neto y el del rotor, se puede expresar de manera que resulte útil, es decir, el ángulo  $\delta$  es justamente igual al ángulo del factor de potencia del rotor más  $90^\circ$

$$\delta = \theta_R + 90^\circ$$

por lo tanto,  $\text{sen } \delta = \text{sen}(\theta + 90) = \cos \theta_R$ , Este término es el factor de potencia del rotor. El ángulo del factor de potencia del rotor se puede calcular a partir de la ecuación.

$$\theta_R = \tan^{-1} \left[ \frac{X_R}{R_R} \right]$$

$$\theta_R = \tan^{-1} \left[ \frac{sX_{RO}}{R_R} \right]$$

Y el factor de potencia del rotor queda dado por

$$fp_R = \cos \theta_R$$

$$fp_R = \cos \left[ \tan^{-1} \left[ \frac{sX_{RO}}{R_R} \right] \right]$$

suponga que el motor de inducción se carga, a medida que aumenta la carga, aumenta el deslizamiento y disminuye la velocidad del rotor. Como ahora la velocidad es menor, aumenta la velocidad relativa entre el rotor y el campo magnético del estator de la máquina. Esta mayor velocidad produce un mayor voltaje en el rotor, el cual a su vez, produce una mayor corriente en el rotor. Con una mayor corriente, el campo magnético del rotor también crece. Sin embargo el ángulo de la corriente y el campo magnético del rotor también cambia. Como ahora el deslizamiento es grande, la frecuencia del rotor crece y la reactancia del rotor aumenta. Entonces, la corriente del rotor está ahora más atrasada con respecto al voltaje y el campo magnético del rotor se desplaza con la corriente. El incremento de  $B_r$  tiende a incrementar el par, mientras que el aumento del ángulo  $\delta$  tiende a disminuirlo ( $\tau_{ind}$  es directamente proporcional a  $\sin \delta$ , y  $\delta > 90^\circ$ ). Como el primer efecto es mayor que el segundo, el par total producido aumenta para atender la carga del motor que ha aumentado.

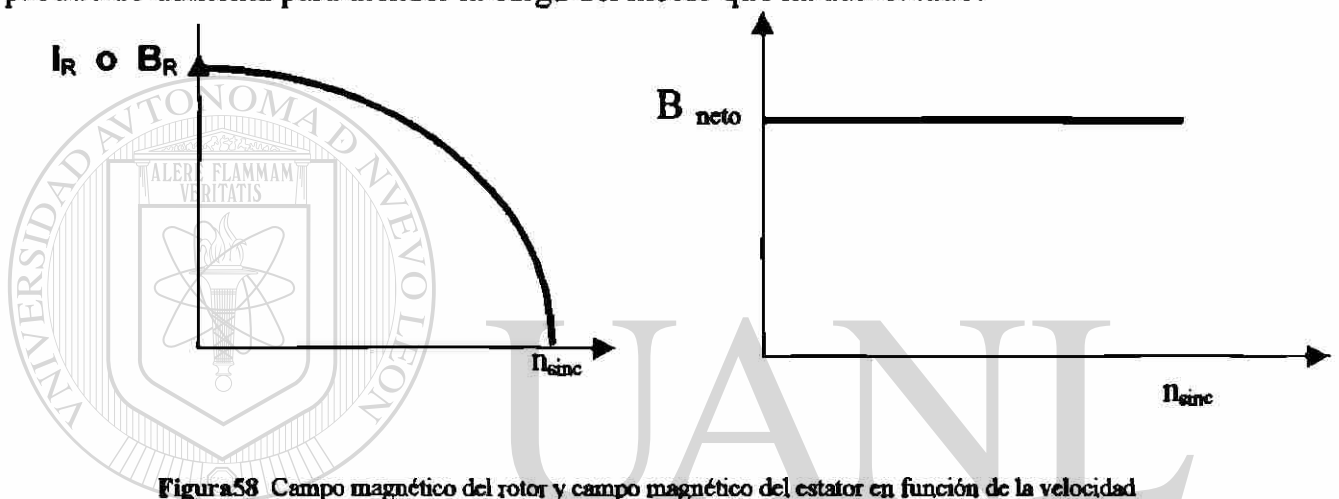


Figura 58 Campo magnético del rotor y campo magnético del estator en función de la velocidad

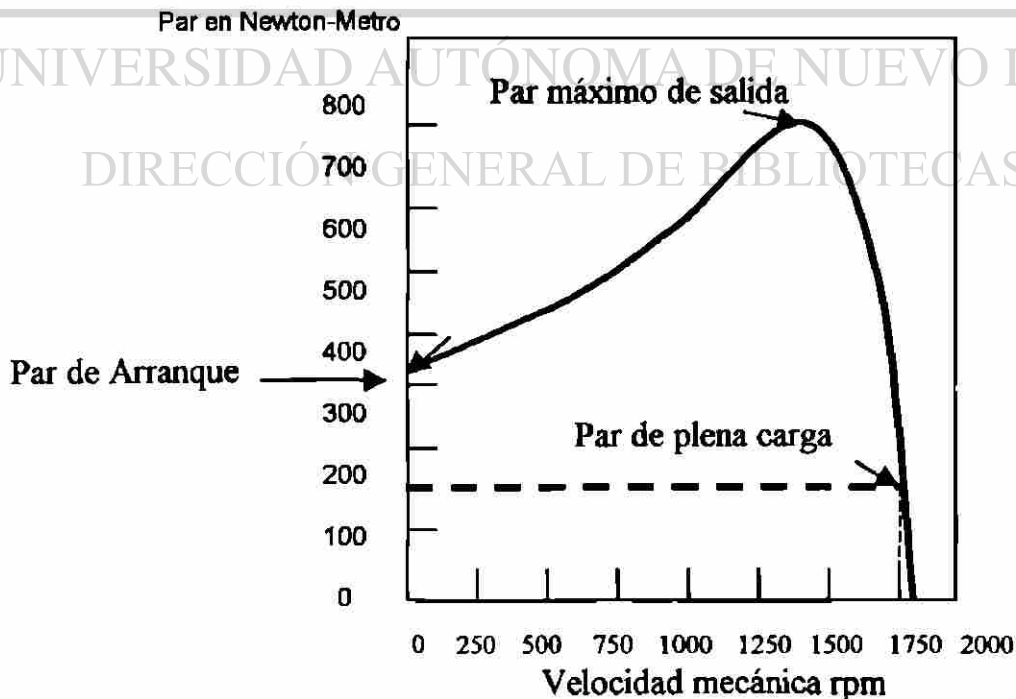


Figura 59 Curva característica par-velocidad de un motor de inducción

### Comentarios sobre la curva par velocidad del motor de inducción.

- El par es producido por un motor de inducción a velocidad sincrónica es cero.
- La curva par-velocidad es prácticamente lineal entre vacío y plena carga. En este rango, la resistencia del motor es mucho mayor que su reactancia, y por lo tanto, la corriente del rotor y el par producido crecen linealmente al aumentar el deslizamiento.
- Existe un par máximo posible que el motor no puede sobrepasar. Este par se denomina par máximo desarrollado o par de desenganche y es de dos a tres veces el par nominal del motor.
- El par de arranque del motor es ligeramente mayor que su par de plena carga, así el motor debe poder arrancar arrastrando cualquier carga, hasta la nominal.
- Para un deslizamiento dado, el par del motor varía con el cuadrado del voltaje aplicado. Este hecho es utilizado para controlar la velocidad del motor.
- Si el rotor de un motor de inducción se hace girar a una velocidad superior a la velocidad sincrónica, se invierte la dirección del par desarrollado y la máquina funciona como generador, convirtiendo potencia mecánica en potencia eléctrica.
- Si el rotor gira en dirección contraria a la del campo magnético, el par producido hará que la máquina se detenga rápidamente y comience luego a girar en dirección contraria. Puesto que para invertir el sentido de la rotación del campo magnético basta intercambiar dos de las fases del estator, este hecho se utiliza como una forma de frenado rápido de motor de inducción. Al proceso de intercambiar dos fases con el fin de frenar rápidamente el motor, se le llama intercambio de fase.

### 6.14 Terminales y Devanados de Los Motores Trifásicos.

Los motores trifásicos se pueden diferenciar por el número de terminales que tienen; obviamente este número debe ser una potencia de 3 y los más usuales son los de 3, 6, 9 y 12 terminales.

#### Motor de 3 terminales.

Este tipo de motores tiene como característica principal que sólo funcionan a una tensión de servicio. A continuación se presentan los dos tipos de conexiones que pueden tener los motores trifásicos de tres terminales:

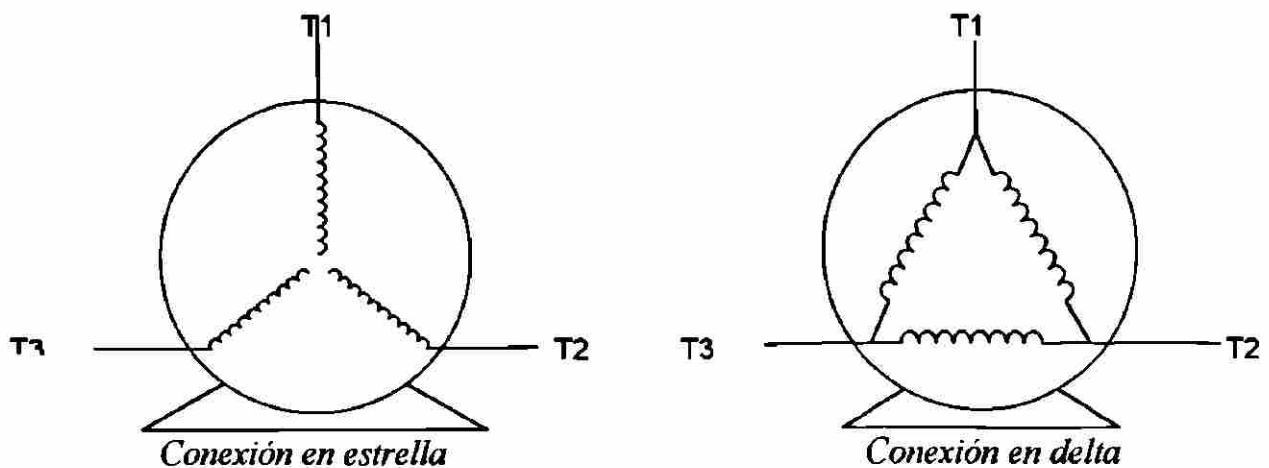


Figura 60 Conexión de un motor de 3 terminales

### Motor de 6 terminales.

Este tipo de motores también opera con una sola tensión de servicio, pero ahora la ventaja es que se puede conectar ya sea en delta o en estrella, según las necesidades. La identificación de terminales es la siguiente:

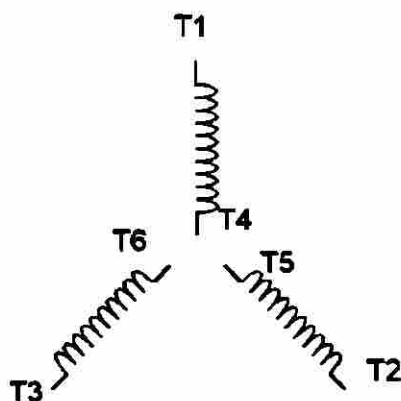


Figura 61 Devanados del motor con 6 terminales.

Como se pudo observar en la figura, la numeración para las terminales se hace a favor de las manecillas del reloj, y partiendo de las terminales que están por la parte exterior hasta las que están en la parte interior; esta es una norma que se utiliza para estandarizar la identificación de terminales de los devanados. Las conexiones en la caja de terminales de cada una de las configuraciones (delta o estrella) quedarían de la siguiente manera:



Conexión estrella

Conexión delta

Figura 62 Conexiones en la caja de terminales de un motor de 6 puntas

### Motor de 9 terminales.

Este tipo de motor se puede conectar ya sea como una estrella gigante o como dos estrellas en paralelo; la conexión en delta no se utiliza. Puede trabajar con dos tensiones de servicio:

- Para 220 V se conecta como 2 Y en paralelo.
- Para 440 V se conecta como una estrella gigante.

La identificación de las terminales de sus devanados quedaría así:

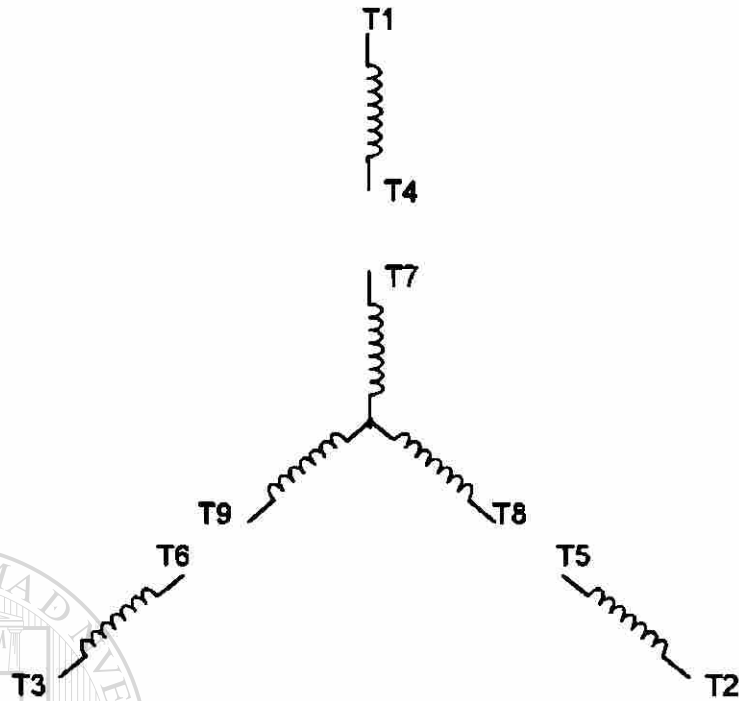


Figura 63 Motor de 9 terminales

Las conexiones en la caja de terminales para trabajar con las distintas tensiones de servicio se presentan en la siguiente figura.



Figura 64 Conexiones en la caja de terminales de un motor de 9 puntas

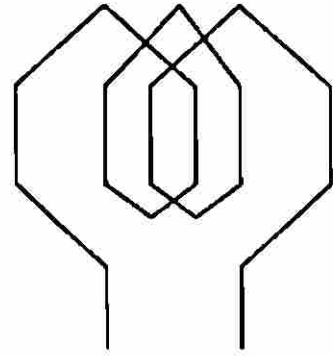
Existen también los motores de 12 terminales, los cuales se pueden conectar ya sea en delta o en estrella, y pueden trabajar también con dos voltajes de servicio; queda como práctica realizar los diagramas para este tipo de motores, y hacer la conexión de sus terminales para sus cuatro modos de operación (estrella a 220 V, delta a 220 V, estrella a 440 V y delta a 440 V).

Devanados trifásicos.

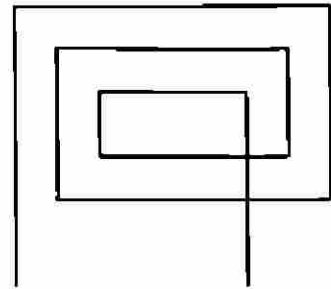
En el embobinado tanto de motores como de generadores se pueden encontrar diversas formas de colocar las bobinas en las ranuras del estator; dichas formas son:



**Embobinado imbricado:**  
Se utiliza en motores trifásicos.



**Embobinado concéntrico:**  
Se usa en motores monofásicos  
(principalmente) y trifásicos.



**Ondulado:**  
Se utiliza en generadores.

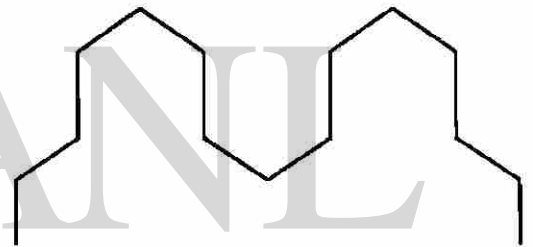


Figura 65 Tipos de devanados trifásicos

Cuando en una ranura del estator se localizan dos lados de la bobina al devanado se le llama devanado en doble capa.

Existen ciertos parámetros que se consideran al embobinar un motor trifásico. Dichos parámetros se refieren al número de polos, número de ranuras por polo, número de bobinas por grupo y grados por ranura, a continuación explicamos cada uno de ellos.

Ancho de la bobina (AB).

Se refiere al número de ranuras que cubren los polos magnéticos de cada una de las fases del sistema de alimentación trifásico. la ecuación para determinarlo es:

$$AB = \frac{Q}{P}$$

Donde: Q = número de ranuras  
P = número de polos

### Grados eléctricos por ranura ( $^{\circ}$ /Ranura)

Primeramente se debe especificar que estos grados eléctricos son los del sistema trifásico, así un ciclo completo de cualquiera de las fases A, B o C representa los  $360^{\circ}$  eléctricos. De esta manera, a cada ranura se le asigna una cierta cantidad de grados eléctricos y dependiendo del número de ranuras y del número de polos, pudiera ser que estos grados eléctricos no tengan una relación 1:1 con los grados mecánicos que estamos acostumbrados a manejar, es decir, que quizá para los  $360^{\circ}$  mecánicos que forman el estator, la sumatoria de todos los grados eléctricos de las ranuras, pudiera ser igual a 720. La manera de calcular los grados eléctricos por ranura es:

$$^{\circ}E / \text{Ranura} = \frac{180^{\circ} \times P}{Q}$$

### Numero de grupos polo-fase (g)

A cada fase del sistema de alimentación le corresponden uno o mas polos magneticos norte y sur. El número de grupos polo-fase es el total de polos magnéticos de las tres fases con las que se alimenta el motor y esta dado por:

$$g = m \times P$$

Donde: m = Numero de fases

### Numero de bobinas por grupo.

Como se puede deducir, esto se refiere a la cantidad de bobinas que componen cada uno de los grupos que acabamos de mencionar.

$$\# \text{bobinas/ grupo} = \frac{Q}{g}$$

### Ejemplo:

Desarrollar un devanado trifásico imbricado doble capa para un motor de 4 polos y 12 ranuras, conectarlo como un motor de 9 terminales.

m = 3 fases  
P = 4 polos  
Q = 12 ranuras  
9 Terminales

$$\begin{aligned} AB &= Q/P = 12 / 4 = 3 \text{ ranuras} \\ g &= m \times P = 3 \times 4 = 12 \text{ grupos} \\ ^{\circ}/\text{Ranura} &= (180 \times P)/12 = (180 \times 4) / 12 \\ &= 60^{\circ} \\ \# \text{ bobinas/gpo} &= Q / g = 12 / 12 = 1 \text{ bobina} \end{aligned}$$

El devanado quedaría de la siguiente forma:

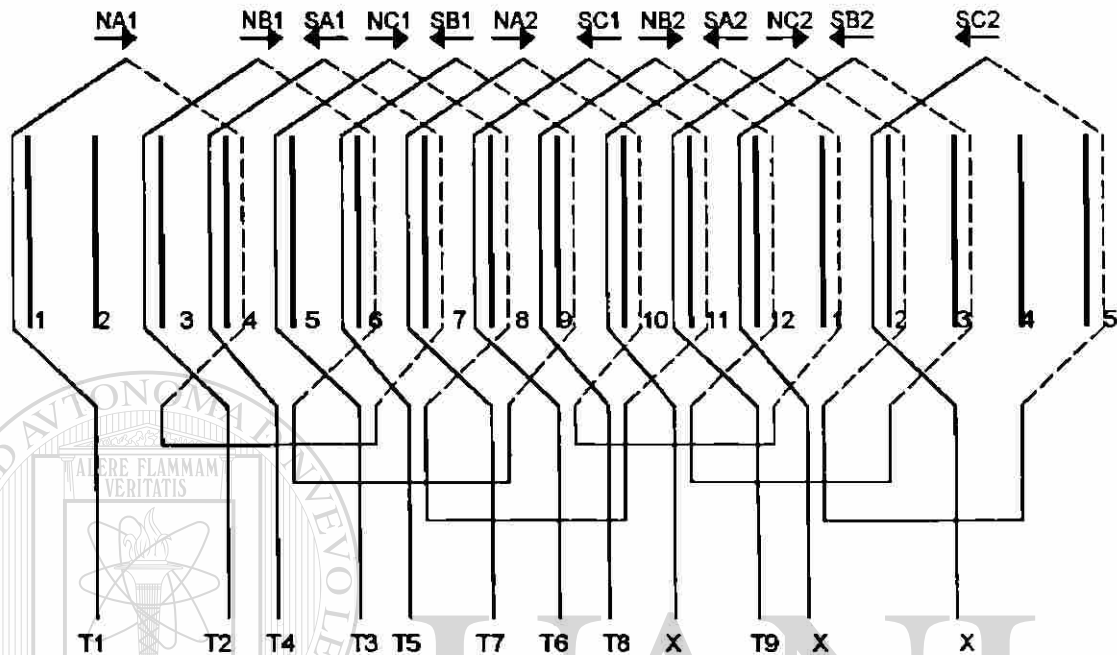


Figura 66 Devanado trifásico imbricado doble capa de 4 polos y 12 ranuras

En el ejemplo anterior, para cada una de las fases existen 4 polos magnéticos (2 norte y 2 sur), por lo tanto el campo magnético en el estator tendría una forma más o menos así:

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

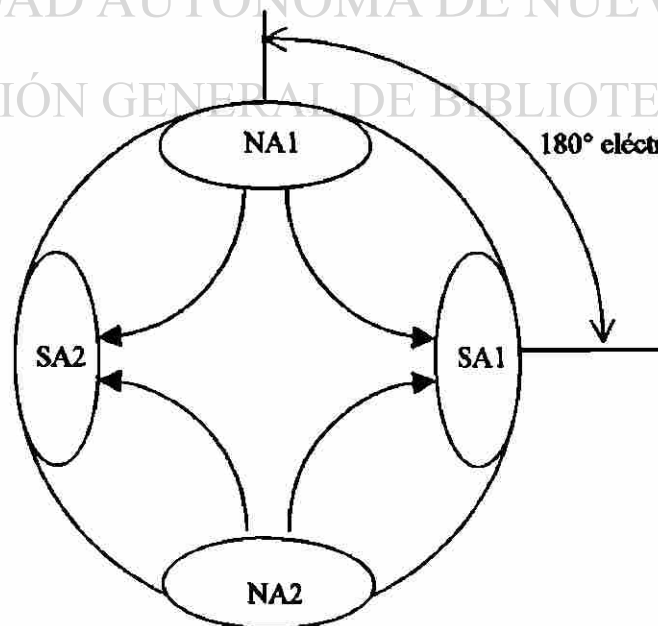


Figura 67 Diagrama esquemático de un motor de 4 polos

## 6.15 Clases de Diseño de Motores de Inducción

Modificando las características físicas de los rotores de los motores de inducción puede obtenerse una gran variedad de curvas par-velocidad, con el fin de ayudar a la industria en la selección apropiada de los motores para las variadas aplicaciones y para cualquier potencia. NEMA en los Estados Unidos y la Internacional Electrical Commission (IEC) en Europa han definido una serie de diseños de normalizados con diferentes curvas par-velocidad.

**Diseño clase A.-** Los motores de clase A son los motores de diseño común, con un par de arranque normal, una corriente de arranque normal y un deslizamiento bajo. Las corrientes de arranque típicas de este motor pueden ser de aproximadamente 500 a 800 por ciento de la corriente nominal.

Algunas aplicaciones típicas de estos motores son: impulso de ventiladores , bombas, tornos y otras maquinas herramientas.

**Diseño clase B.-** Los motores de clase B tienen un par de arranque normal, corriente de arranque pequeña y deslizamiento bajo. Estos motores producen el mismo par de arranque que los motores de clase A, con una corriente alrededor de 25 por ciento menor. El par máximo de salida es mayor o igual al 200 por ciento del par a carga nominal.

**Diseño clase C.-** Los motores de clase C tienen un alto par de arranque con corriente de arranque pequeña y operan con un deslizamiento bajo (menor que 5 por ciento) a plena carga.

**Diseño clase D.-** Los motores de clase D tienen un par de arranque muy alto (275 por ciento o mas que el nominal) y una corriente de arranque pequeña, pero a plena carga tienen un deslizamiento alto. Esencialmente son motores de clase A pero con las barras del rotor mas pequeñas y hechas con material de mayor resistencia.

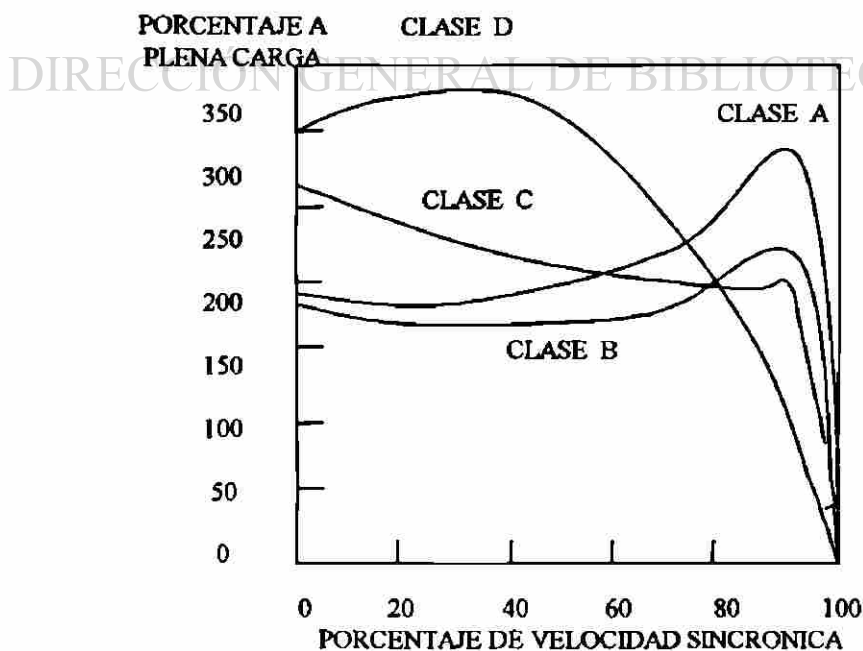


Figura 68 Curvas características típicas par-velocidad para motores con rotores de diferentes diseños.

## 6.16 Tendencias de Los Motores de Inducción

El motor de inducción trifásico, ya completamente desarrollado estaba disponible comercialmente desde 1896, desde entonces y hasta la fecha se han logrado continuos progresos en la calidad de los aceros, las técnicas de fundición, los aislamientos y las características empleadas en la construcción de motores de inducción.

Ahora, casi todos los grandes fabricantes están produciendo motores de inducción de alta eficiencia, cuya participación en el mercado de los motores de inducción aumenta continuamente. Se han utilizado varias técnicas para mejorar la eficiencia de estos motores comparada con la eficiencia de los motores de diseño tradicional. Entre estas técnicas están:

- Utilizar más cobre en los devanados del estator para reducir las pérdidas en el cobre.
  - Aumentar la longitud de los núcleos del estator y del rotor para reducir a densidad de flujo magnético en el entrehierro de la máquina.
  - Utilizar más acero en el estator de la máquina, permitiendo una mayor cantidad de transferencia de calor hacia el exterior de la misma, con lo que se reduce su temperatura de operación.
  - El acero utilizado en el estator es un acero especial con alta graduación eléctrica, con muy pocas pérdidas por histéresis.
  - Se utiliza acero de calibres especialmente delgados, es decir, las laminaciones son muy compactas y de una resistividad interna muy alta.
- 
- Los rotores se maquinan cuidadosamente para reducir un entrehierro uniforme, con lo cual se logran reducir las pérdidas adicionales en el motor.

## 7. MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

### 7.1 Introducción

Todas las maquinas eléctricas funcionan según los mismos principios básicos y su comportamiento esta gobernado solamente por unas pocas leyes fundamentales. Estas leyes son las que relacionan la corriente, el campo magnético y el par; y la velocidad, el campo magnético y el voltaje desarrollado.

Los dos elementos indispensables de la maquina eléctrica son el flujo magnético y los conductores por los que circulan corrientes.

Los motores de corriente directa, generalmente se prefieren sobre cualquier otro tipo, en aquellas aplicaciones en donde se requiere una velocidad de operación variable. La razón primordial, proviene del hecho de que la velocidad en estos motores, pueden controlarse relativamente fácil, ajustando ya sea el voltaje de su armadura, de su campo o de ambas, dependiendo de las características de funcionamiento que se deseen.

### 7.2 Constitución de Las Maquinas de Corriente Continua

#### Conceptos Generales.

La energía en forma de corriente continua y las máquinas para utilizarla se usan mucho para la tracción y en ciertas clases de transmisiones industriales.

Las principales ventajas de los motores de c.c. son su excelente par de arranque y la facilidad para controlar su velocidad entre límites muy apartados.

Los motores de c.c. son ideales para impulsar ciertas clases de máquinas que son difíciles de poner en marcha en carga y que tienen que ser impulsadas a velocidades variables o tal vez invertirse con frecuencia el sentido de marcha. Su velocidad puede variarse entre límites muy amplios, por encima y por debajo de la normal.

Muchos miles de fábricas y plantas industriales utilizan exclusivamente motores eléctricos para impulsar diversas máquinas y, en ciertas clases de trabajo, se emplean muchísimo los motores de c.c. Estos motores se construyen en tamaños que van desde 1/10 HP hasta varios miles de caballos, y se emplean tanto para mover un grupo de máquinas como para máquinas individuales.

Para mover tranvías y trenes elevados en las ciudades, y también los trenes eléctricos que cruzan el país, se emplean muchísimo los motores serie de c.c., porque su elevado par de arranque les permite arrancar fácilmente un coche o un tren cargado desde la posición de reposo y llevarlo rápidamente a adquirir velocidades muy grandes.

Los motores de c.c. se construyen por lo general para funcionar con voltajes de 110, 220 y 440 voltios, para los servicios industriales.

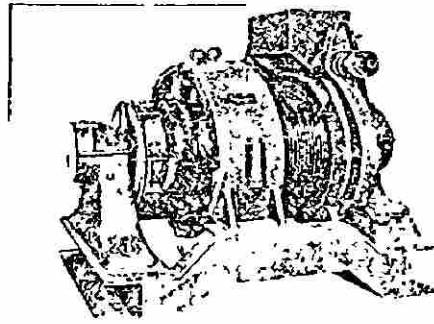


figura 69 Motor de c.c. con su cable de acero utilizado en ascensores

En el funcionamiento de las dinamos la velocidad a que deben moverse no es tan crítica como en el caso de los generadores de corriente alterna o alternadores.

Las dinamos se construyen en tamaños que varían entre 60 Watts, para usos automotrices, hasta los de varios miles de kilowatts para las centrales eléctricas industriales y de ferrocarriles. Sus voltajes varían entre 6 volts, en los generadores para automóviles, hasta 440 voltios para los usos industriales, y hasta 600 y 750 voltios para las aplicaciones ferroviarias, tales como las centrales de ferrocarriles eléctricos, los tranvías y los trolebuses.

Las de tamaños más pequeños impulsadas por correa funcionan a velocidades de 300 a 1800 r.p.m., en tanto que las de tamaños mayores que están directamente conectadas a máquinas de vapor o motores de gas o de aceites pesados marchan a velocidades que oscilan entre 60 y 250 r.p.m.

La corriente continua no se emplea mucho cuando la energía tiene que transmitirse a distancias superiores a 800 ó 1600 m, ya que para transmitir grandes cantidades de energía a distancias considerables es necesario emplear un voltaje elevado y, por lo general, no es práctico que funcionen las grandes dinamos a voltajes superiores a 750 voltios.

### 7.3 Partes y Principio de Funcionamiento de Las Maquinas de Corriente Continua.

Partes de una maquina de corriente continua.

- Carcasa o Estator que es la que sustenta a la maquina y aquí se encuentra alojado el devanado de campo
- Rotor que es la parte móvil y aquí se encuentra alojado el devanado de armadura.
- Conmutador que cambia la c.c. a c.a en un motor y de c.a. a c.c. en un generador.
- Escobillas que recogen o entregan la corriente al devanado de armadura.

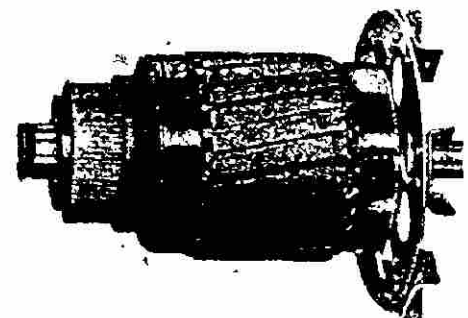
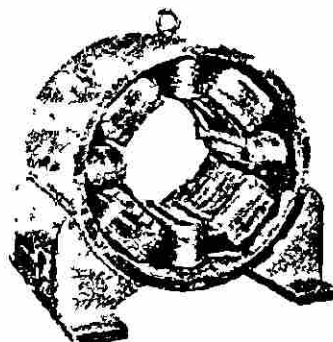
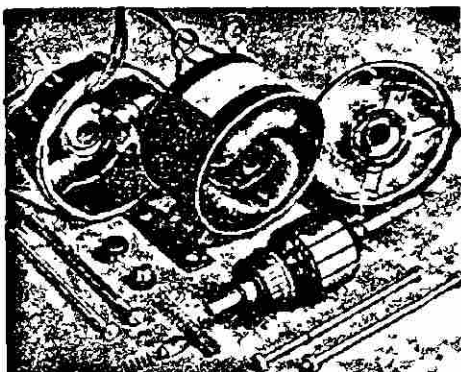


Figura 70 Partes de la maquina de c.c.

El flujo magnético y los conductores por los que circulan corrientes constituyen los dos elementos indispensables de la máquina eléctrica. La parte de la máquina sobre la cual se hallan situados los conductores que producen las fuerzas tangenciales se denomina inducido aquí se encuentra alojado el devanado de armadura. En las máquinas de c.c. este constituye la parte interior giratoria (rotor) de la máquina. Los electroimanes (polos) son estacionarios y están conectados con la carcasa o parte exterior de la máquina a este devanado se le llama devanado de campo.

El inductor (Devanado de Campo) en las máquinas de corriente continua es también el estator o parte fija de la máquina. El sistema inductor produce el campo magnético necesario para crear las corrientes inducidas. Este campo magnético puede ser producido por imanes permanentes o por electroimanes. Las bobinas que constituyen los arrollamientos de excitación de los diferentes polos, están conectadas entre sí de manera que formen, alternativamente, un polo norte y un polo sur.

La finalidad del conmutador es cambiar la forma del voltaje de c.a. a c.d. y viceversa, la corriente se conduce de la escobilla al portaescobillas mediante una trenza flexible de cobre. A fin de producir la presión necesaria para el deslizamiento suave de la escobilla sobre el colector, un muelle ajustable actúa sobre la parte superior de la escobilla. Las escobillas son unos contactos a presión. Estas generalmente son de carbón y se fabrican en gran número de grados, que van desde el carbón duro de retorta, que tiene propiedades abrasivas, hasta el grafito muy blando, que posee cualidades lubricantes.

Los elementos constructivos de las máquinas de corriente continua, son idénticos para el motor que para el generador. De forma, que una misma máquina puede producir corriente continua si se aplica a su inducido un movimiento giratorio (caso del generador) o, por el contrario, se producirá un movimiento giratorio en la máquina si alimentamos su inducido con la corriente continua procedente de la red (caso del motor).

El colector consiste en segmentos de cobre duro en forma de cuña, llamados delgas o laminas, completamente aislados unos de otros, así como del eje de apoyo, por medio de piezas de mica moldeadas, constituyendo, de esta forma, un arco circular.

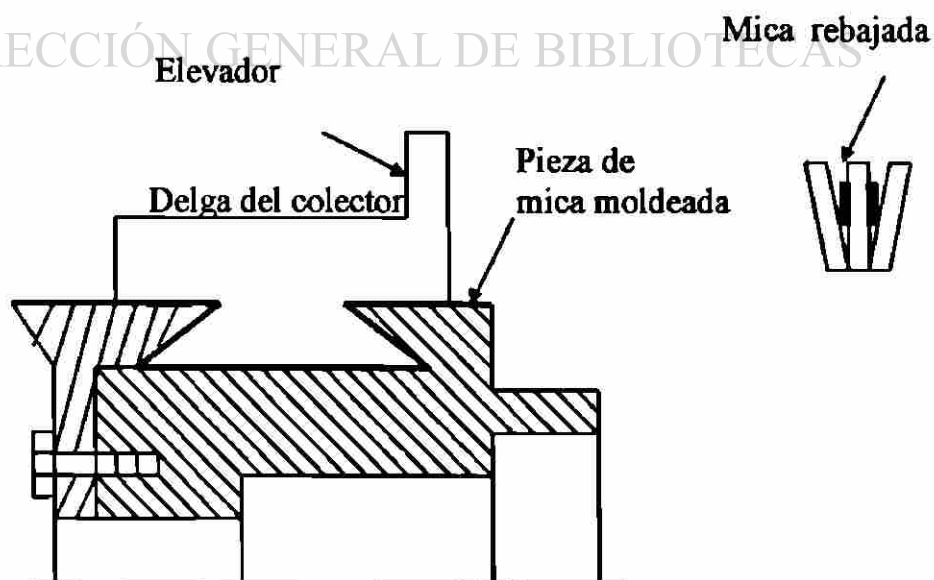


Figura 71 Construcción de un conmutador



## 7.4 Potencia y Elevaciones de Temperatura en Las Maquinas De Corriente Continua

Las dinamos y los motores de c.c. son casi exactamente idénticos en su construcción mecánica y que, en muchos casos, puede usarse la misma máquina como motor o generador, con sólo ligeros cambios en las conexiones del inductor, un ajuste de las escobillas, etc. Este es un detalle que deberá tenerse presente, ya que muchos de los puntos cubiertos sobre la construcción, el funcionamiento, las cargas, las temperaturas, etc., son aplicables a los motores y las dinamos.

La potencia nominal de las maquinas se indica siempre en kilowatts, que es una unidad de energía eléctrica. Será conveniente, sin embargo, recordar aquí que 1 kilowatts es igual a 1000 watts y aproximadamente a 1,36 HP (caballos de potencia) o 1,34 hp (caballos ingleses). los watts consumidos en un circuito cualquiera son iguales al producto del voltaje por la corriente

La potencia nominal en Kw de una dinamo, es la carga que podrá soportar continuamente sin un calentamiento excesivo, sin que se produzcan demasiadas chispas en el conmutador o sin que la caída de voltaje interno sea excesiva.

Casi todas las maquinas se construyen para poder soportar alguna sobrecarga durante periodos cortos sin que se perjudique la máquina. Esta sobrecarga suele ser del 15 al 25 por ciento durante periodos no mayores de una hora poco más o menos.

Las elevaciones de temperatura que no ofrecen riesgo en la maquinaria eléctrica dependen de las temperaturas que pueden soportar sin estropearse sus materiales aislantes. Todos los demás materiales de la máquina son metales que pueden someterse a temperaturas bastante elevadas sin sufrir mucho daño.

Claro está que cuanto más elevada sea la temperatura de los arrollamientos de cobre tanto mayor será su resistencia; y tanto más elevadas han de ser también las pérdidas debidas a la caída de voltaje en la máquina.

Los aislamientos combustibles ordinarios como la seda, el algodón y el papel no deben someterse nunca a temperaturas superiores a 100°C (212°F). La mica, el asbesto (o amianto) y otros materiales aislantes no combustibles pueden someterse a temperaturas de hasta 125°C (257°F).

Al fijar las elevaciones de temperatura que puede soportar la maquinaria eléctrica, se parte del supuesto de que la temperatura en las habitaciones en las que se instalan las máquinas no excederá nunca de 40°C. (104°F). Esto da, para los materiales aislantes ordinarios, una elevación admisible de 100°C - 40°C, o sea, 60°C. (108° F.). Para los materiales aislantes no combustibles, la elevación de temperatura admisible es 125°C - 40°C, o sea, 85° C. (153° F.).

Los generadores y los motores ordinarios suelen estar garantizados por los fabricantes para funcionar continuamente a plena carga, sin sobrepasar una elevación de temperatura de 35° C., 40° C. o 50° C., según sea el caso.

Las temperaturas de las máquinas pueden comprobarse poniendo pequeños termómetros entre los extremos de su arrollamientos o muy cerca de ellos. Una regla general que conviene recordar es que si puede mantenerse la mano sobre la armazón o culata de la máquina cerca de los devanados sin que el calor moleste mucho, éstos no se han calentado peligrosamente.

## 7.5 Clasificación de Las Maquinas de Corriente Continua

Según su excitación las maquinas de c.c. se clasifican en:

- Excitadas por separado
- Autoexcitadas

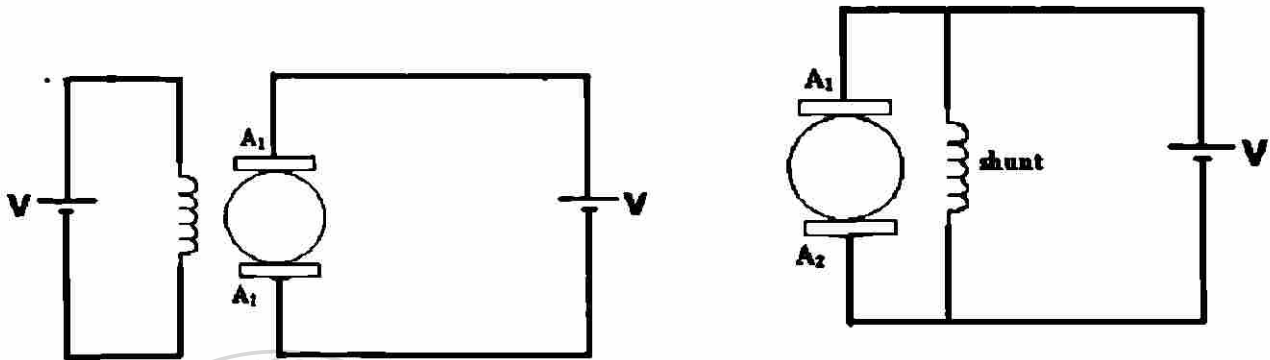


Figura 72 Máquina excitada por separado y shunt autoexcitada

Las maquinas de c.c. pueden dividirse en varias clases, según la construcción de su inductor y sus conexiones. Estos tipos se llaman respectivamente:

- maquinas shunt o excitadas en paralelo
- maquinas serie o excitadas en serie
- maquinas compound o de excitación compuesta.

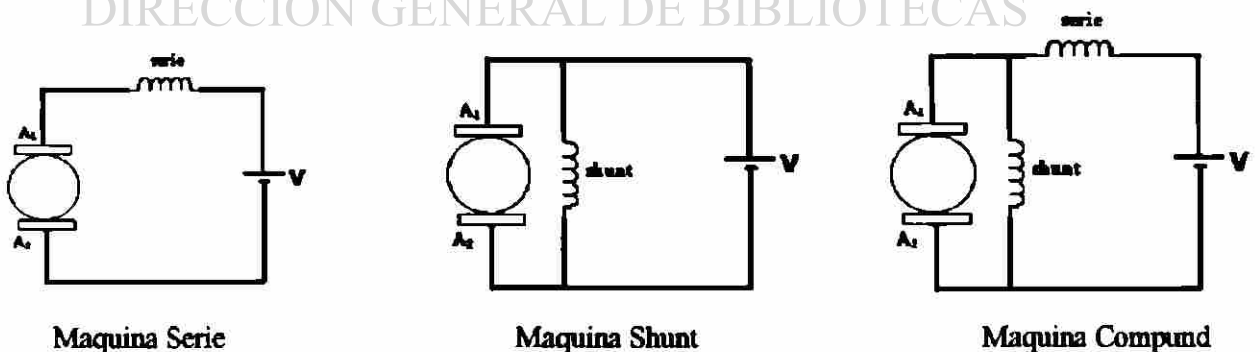


Figura 73 Diagramas eléctricos de las maquinas serie, shunt y compound

La maquina shunt tiene sus bobinas inductoras conectadas en paralelo con el inducido. Las bobinas inductoras shunt se componen de un gran número de vueltas de alambre de pequeño diámetro y con una resistencia suficiente para que puedan estar permanentemente conectadas a través de las escobillas y soportar todo el voltaje del inducido constantemente

durante el funcionamiento. Por consiguiente, la corriente que circula por esas bobinas depende de su resistencia y del voltaje del inducido y es pequeña.

Las máquinas serie tienen sus bobinas inductoras conectadas en serie con el inducido, de modo que circula por ellas toda la corriente de la carga. Esas bobinas tienen que hacerse, naturalmente, con alambre grueso para que puedan soportar la corriente de la línea y se componen, por lo general, de sólo muy pocas vueltas.

Las máquinas compound son las que tienen a la vez arrollamientos inductores en serie y en derivación.

## 7.6 Dinamos Shunt

Siendo la dinamo shunt una máquina autoexcitada, empezará a desarrollar su voltaje partiendo del magnetismo residual tan pronto como el inducido empiece a girar. Después, a medida que el inducido va desarrollando voltaje, éste envía corriente a través del inductor, aumentando el número de líneas de fuerza y desarrollando el voltaje hasta hasta su valor normal. Puesto que el circuito inductor y el circuito de la carga están ambos conectados a través de los terminales de la dinamo, cualquier corriente engendrada en el inducido tiene que dividirse entre esas dos trayectorias en proporción inversa a sus resistencias y puesto que la resistencia del circuito inductor es relativamente elevada, la mayor parte de la corriente pasa por el circuito de la carga, impidiendo así el aumento en la intensidad del campo magnético esencial para producir el voltaje normal entre las terminales.

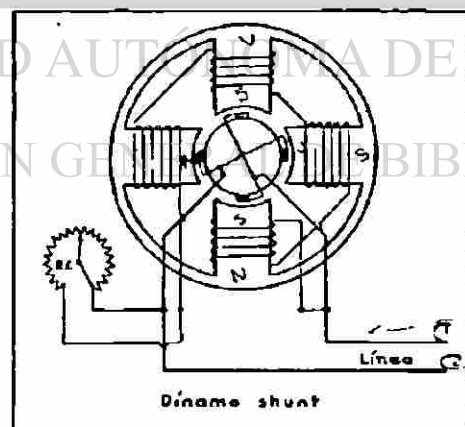


Figura 74 Diagrama esquemático de un generador "Shunt"

### Características de voltaje de las dinamos shunt

El voltaje de una dinamo shunt variará en razón inversa de la carga, el aumento de la carga hace que aumente la caída de voltaje en el circuito de inducido, reduciendo así el voltaje aplicado al inductor. Esto reduce la intensidad del campo magnético y, por consiguiente, el voltaje del generador.

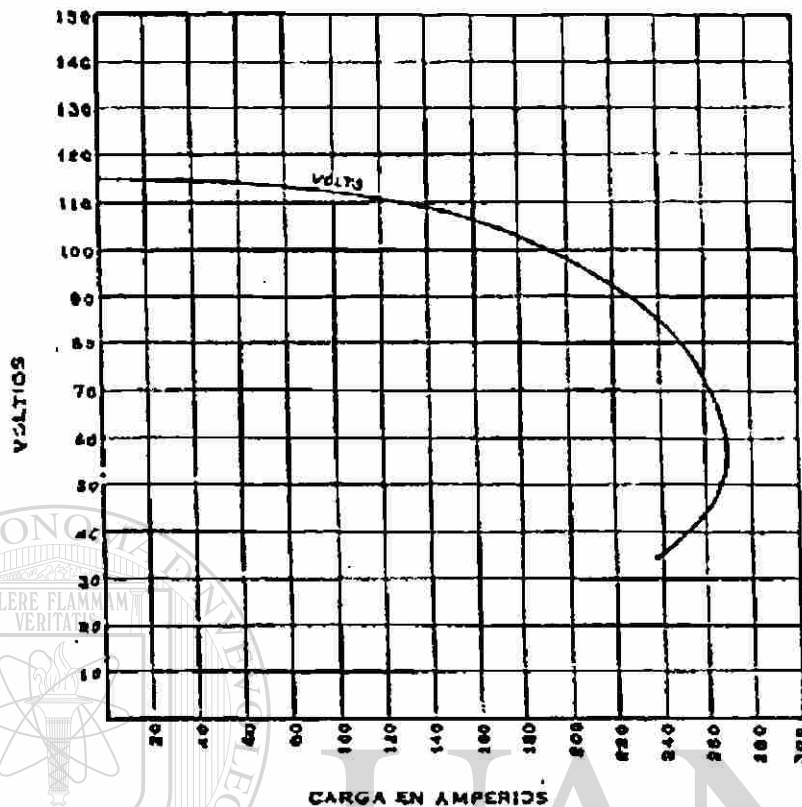


Figura 75 característica de carga de un generador "Shunt"

Si se aumenta bruscamente la carga aplicada a una dinamo shunt la caída de voltaje puede ser bastante apreciable, mientras que si se suprime casi por entero la carga, la regulación de voltaje de una dinamo shunt es muy defectuosa debido a que su regulación no es inherente ni mantiene su voltaje en un valor constante.

Por consiguiente, las dinamos shunt no se adaptan bien a los trabajos fuertes, pero pueden emplearse para el alumbrado por medio de lámparas incandescentes o para alimentar otros aparatos de potencial constante en los que las variaciones de carga no sean demasiado pronunciadas.

## 7.7 Dinamos Serie

Estas máquinas tienen bobinas inductoras conectadas en serie con el inducido y la carga, El bobinado inductor suele componerse de alambre o cinta de cobre gruesa, de modo que pueda soportar sin recalentarse la corriente de plena carga. Si no hay ninguna carga conectada a la línea, será imposible que pase ninguna corriente por el arrollamiento inductor en serie y que, por consiguiente, la dinamo serie no desarrolle voltaje cuando arranca, es preciso que haya alguna carga conectada al circuito de línea. Característica de voltaje de las dinamos serie Cuando mayor sea la carga conectada a una dinamo serie, tanto más intensa será la corriente que pase por el arrollamiento inductor y tanto más intenso será su campo magnético. Esto hace que el voltaje de una dinamo serie varíe en proporción directa con la

carga; esto es, que el voltaje aumente a medida que aumenta la carga y disminuya a medida que baje la carga. Se observará que esto es exactamente lo opuesto a lo que sucede en el caso de una dinamo shunt.

Puesto que la mayoría de las máquinas eléctricas tienen que funcionar con un voltaje constante y están conectadas a la línea en paralelo, las dinamos serie no se emplean para los fines ordinarios ni para el alumbrado por medio de lámparas incandescentes. Su principal empleo ha sido en relación con las lámparas de arco en serie para el alumbrado público.

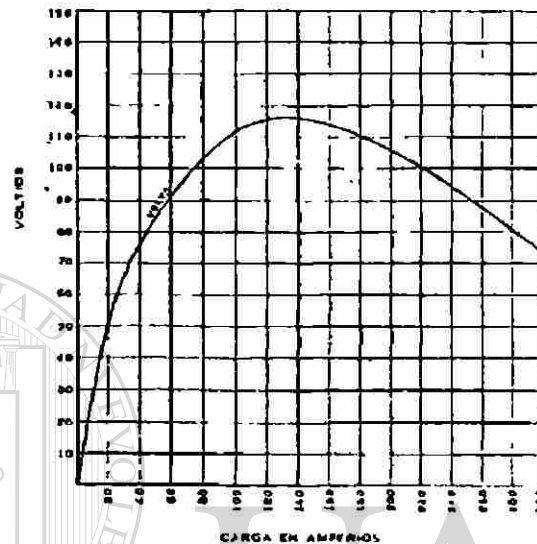


Figura 76 Característica de carga de un generador serie

## 7.8 Dinamos Compound

Las bobinas inductoras de un dinamo compound se componen de arrollamientos en serie y en paralelo, estando colocados dos bobinados distintos sobre cada polo. La bobina inductora shunt esta conectada en paralelo con el inducido y, por consiguiente, mantiene su intensidad bastante constante. La bobina inductora en serie estando en serie con el inducido y la carga, tendrá su intensidad variable según la carga por consiguiente, estas maquinas tendrán algunas de las características de los dinamos shunt y de las series, ya que el voltaje de la shunt tiende a bajar cuando aumenta la carga. Por consiguiente, diseñando un dinamo compound con las proporciones adecuadas entre los inductores en derivación y en serie, podemos construir una maquina que mantenga un voltaje casi constante con cualesquiera variaciones razonables de la carga.

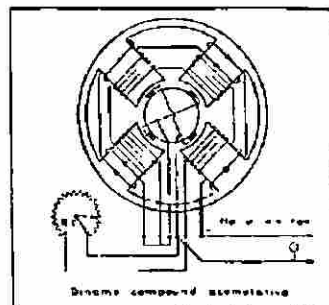


Figura 77 Diagrama esquemático de un generador compound

### Características de voltaje Dinamos "compound" de voltaje constante.

En el tipo de dinamo que acabamos de describir, las bobinas inductoras en derivación y en serie están dispuestas de modo que las corrientes que pasan por ambos arrollamientos circulan alrededor de los polos en la misma dirección, por consiguiente, los bobinados se ayudan mutuamente para crear el flujo inductor. Puesto que la acción de los campos magnéticos es acumulativa, esta dinamo se dice de tipo compound acumulativo. La compound acumulativa es el tipo de c.c. mas empleado.

Algunos dinamos compound tienen las bobinas inductoras en serie arrolladas en sentido opuesto, de modo que su flujo se opone al de las bobinas en derivación. Se llaman dinamos compound diferenciales.

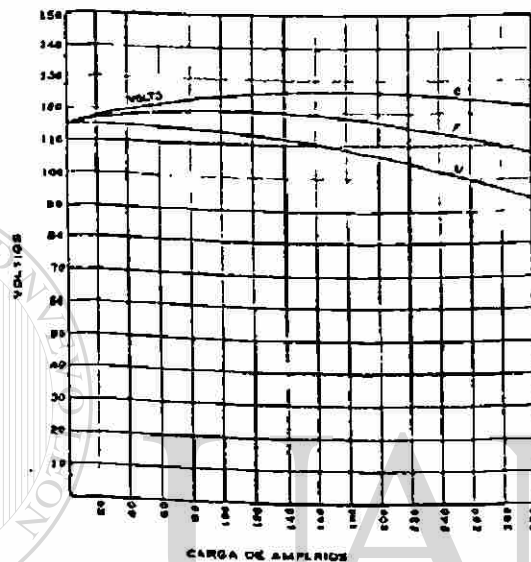


Figura 78 Característica de carga de un generador "Compound"

## 7.9 Funcionamiento de Los Motores de Corriente Continua

El motor de C.C. funciona basándose en la primera ley del magnetismo que dice que los polos del mismo nombre se repelen y los de nombre contrario se atraen, la corriente que circula por las bobinas del inductor produce los polos inductores y la corriente que circula por las bobinas del inducido desarrolla polos en él a media distancia entre los polos inductores. La atracción y la repulsión entre esas dos serie de produce la rotación.

Para que las fuerzas atractivas y repulsivas entre los polos del inducido y los polos inductores se mantengan, a medida que avancen los polos del inducido, tienen que renovarse, reproduciéndolos en el mismo punto del espacio, lo que puede expresarse, algo incorrectamente, pero más gráficamente, diciendo que deben permanecer estacionarios en el espacio. Esta condición es posible por la acción del conmutador y de las escobillas, pues a medida que el inducido avanza caen debajo de las escobillas un grupo diferente de delgas del conmutador y, en consecuencia, se vuelve el suministro de corriente al inducido al mismo punto de este, con relación al espacio en todos los momentos, por consiguiente, los polos del inducido puede decirse que permanecen estacionarios en el espacio, aunque el inducido propiamente dicho gire.

Es esta acción magnética entre los polos del inducido y los inductores la que desarrolla las fuerzas de rotación en el eje del motor que le permiten hacer girar las cargas

mecánicamente conectadas a él. Este esfuerzo rotativo se denomina par de fuerzas o par motor, de un motor que puede ejercer un esfuerzo rotativo relativamente elevado por amper cuando se pone en marcha, se dice que tiene un par de arranque relativamente elevado, y de otro que produce un esfuerzo de rotación relativamente pequeño por amper al arrancar, se dice que tiene un par de arranque relativamente bajo.

El par motor por amper como cualquier motor dado depende del tipo de motor: en serie, shunt o compound, y del diseño de la maquina. En general, el par de arranque por amperio sera mayor en el motor en serie, algo menor para el motor compound y menor aun para el motor shunt.

## 7.10 Motores Shunt.

El arrollamiento inductor de un motor shunt está conectado directamente a la línea o la fuente que suministra la corriente, en paralelo con su inducido. Este arrollamiento inductor shunt se compone de muchas vueltas de alambre fino y tiene una resistencia suficiente en ohms para limitar la corriente que pasa por las bobinas a la capacidad sin riesgo de los conductores que las forman. Como la resistencia del arrollamiento inductor shunt de un motor resulta prácticamente constante, esta corriente y la intensidad del campo inductor que crea dependerán indudablemente del voltaje de línea aplicado al motor.

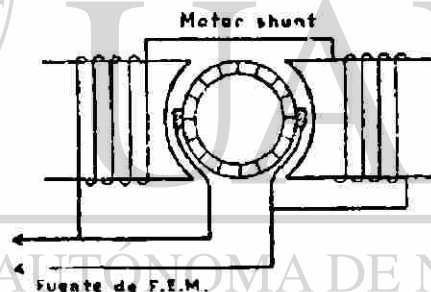


Figura 79 Diagrama de conexiones de un motor "shunt"

Cuando el motor arranca, el par desarrollado debe ser mayor que el par resistente de la carga para obtener un par de aceleración. Mientras el par desarrollado sea mayor que el par de carga más que el par de pérdidas, el inducido se acelerará. La aceleración continuará hasta que el par desarrollado y el par de carga más el par de pérdidas sean iguales. En el arranque de un motor derivación es importante aplicar la tensión nominal al arrollamiento de excitación para producir el valor normal de  $\phi$ . En la ecuación de la velocidad del motor, la velocidad varía inversamente con el flujo  $\phi$  (intensidad de excitación baja), el motor podría acelerarse hasta velocidades muy elevadas y los elevados esfuerzos mecánicos producidos podrían hacer que el motor volara en pedazos. Cuando un motor derivación arranca, no puede, por tanto, conectarse en primer lugar al circuito del inducido y luego el circuito de excitación. Primero debe conectarse al circuito de excitación y luego dar tensión al inducido, o debe cerrarse simultáneamente ambos circuitos. Para que la intensidad del inducido en el arranque no pueda llegar a ser demasiado elevada, antes de aplicar la tensión de líneas se conecta una resistencia de arranque en el circuito del inducido.

## 7.11 Motores Serie.

Los motores serie tienen sus bobinas inductoras conectadas en serie con el inducido y la línea, como se indica en la Figura 79, Los devanados de los inductores de los motores serie se hacen con alambres gruesos o llantas de cobre y pueden consistir en unas cuantas docenas o en varios cientos de vueltas.

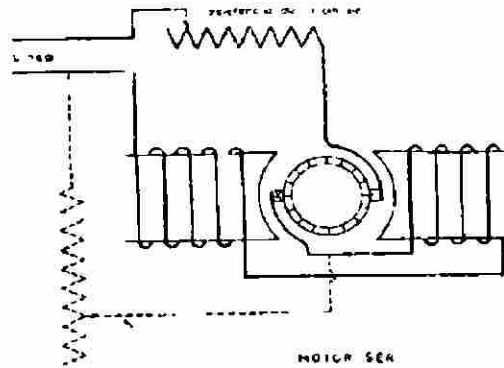


Figura 80 Diagrama de conexiones de un motor serie

La intensidad del campo magnético inductor del motor serie depende de la intensidad de la corriente que pasa por el inducido y por las bobinas inductoras en serie.

Puesto que la corriente que circula por el inducido depende de la carga y la velocidad del motor, la intensidad del campo magnético inductor de un motor serie será mucho mayor con fuertes cargas y velocidades bajas que con cargas ligeras y velocidades mayores, ya que entonces el inducido desarrolla una mayor fuerza contraelectromotriz (F.C.E.M.).

Un motor serie nunca debe conectarse a una línea sin la certeza de que existe carga (excepto en el caso de motores menores de un caballo). Incluso durante el arranque del motor serie, debe vigilarse que exista un cierto par resistente.

Las propiedades sobresalientes del motor serie son: disminución de la velocidad al aumentar el par, un par de arranque elevado que varía casi con el cuadrado de la intensidad para saturación baja, y una potencia de salida comparativamente independiente de las caídas de tensión en los conductores de la línea.

## 7.12 Motor Compound.

El motor compound puede tener características parecidas a las del motor serie o a las del motor derivación. Si el motor serie se provee de un arrollamiento en derivación, se evita la posibilidad de sobrevelocidad en vacío. Si un motor en derivación se provee de un arrollamiento serie, es posible obtener una velocidad casi independiente de la carga y por lo tanto casi constante.

La velocidad puede ser mayor en carga que en vacío. La velocidad puede aumentar rápidamente al aumentar la carga, de manera que la acción del motor será inestable y la velocidad llegará a ser excesiva.

La regulación de velocidad de los motores compound acumulativos puede considerarse como bastante buena. Su velocidad variará en razón inversa de la carga aplicada, porque cualquier aumento en la carga aumenta también el flujo inductor debido a la acción del arrollamiento en serie; y cuando aumenta el flujo inductor, tiene que disminuir



la velocidad del inducido para reducir la fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) lo bastante para permitir que pase suficiente intensidad de corriente para poder soportar la carga. Cuanto más intenso sea el campo magnético inductor de un motor cualquiera, tanto más baja será la velocidad a la cual puede engendrar la fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) normal.

Los motores compound se usan mucho para impulsar cizallas mecánicas, los laminadores de acero, y en las fábricas y las plantas industriales para impulsar máquinas que necesitan unos buenos pares de arranque y de agarrotamiento y no requieren una regulación de velocidad muy minuciosa.

### Motores compound diferenciales

Cuando se conectan los motores compound para que funcionen como motores diferenciales, sus características difieren mucho de las de las máquinas acumulativas.

Un motor compound diferencial tiene su inductor en serie conectado de modo que la corriente pasará por él en la dirección opuesta a la de la corriente de los arrollamientos inductores shunt. Esta corriente de sentido contrario tiende a debilitar el flujo magnético inductor total siempre que el motor soporte alguna carga.

El devanado inductor shunt es el arrollamiento principal y en las condiciones ordinarias determina la polaridad de los polos inductores. Sin embargo, alguna que otra vez, cuando se ponen en marcha esos motores bruscamente y con fuerte carga, la corriente que circula por el arrollamiento en serie diferencial es muy intensa; y debido a su potente flujo y al efecto inductivo que ejerce sobre las bobinas inductoras shunt, durante el tiempo que este flujo se está creando alrededor del arrollamiento en serie, puede vencer al flujo del inductor shunt e invertir la polaridad de los polos inductores. Esto hará que el motor no arranque en su sentido normal, sino que en vez de hacerlo así empezará a marchar en sentido contrario.

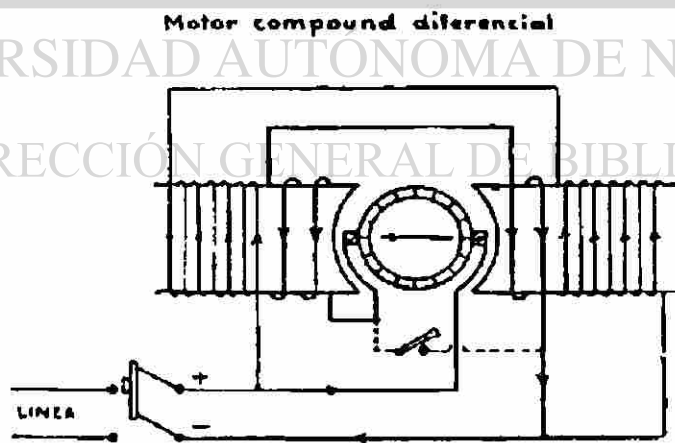


Figura 81 Diagrama de conexiones de un motor compound diferencial

Para evitar esto, el inductor en serie de un motor diferencial debe ponerse en corto circuito al arrancar. Esto puede hacerse empleando un interruptor unipolar de cuchilla del tamaño

apropiado, conectado en derivación a los terminales del arrollamiento en serie, como puede verse en la Figura 80.

### 7.13 Par Motor

Para que un cuerpo que puede girar, como el inducido de un motor, se ponga en movimiento, es esencial que el par motor magnético desarrollado por el sea mayor que el par mecánico resistente-aplicado al eje. Una vez que el inducido está en movimiento se acelera hasta que el par motor y el par resistente sean iguales, cuando se establezca esta situación, la velocidad será constante.

Si se supone que el par motor es constante y que el par resistente aumenta, la velocidad del motor disminuirá constantemente hasta que se pare este. Si las condiciones de funcionamiento son tales que el par resistente no puede ser nunca igual al par motor, el motor se acelerará hasta destruirse.

El motor eléctrico tiende a ser autorregulador en lo que respecta al ajuste del par motor, al par resistente. Siempre que el par resistente resultante de la carga aplicada al motor, varía, se producirá una variación en la velocidad del motor y esta variación en la velocidad será en un sentido tal que hará que los pares motor y resistente sean iguales de nuevo.

El par ejercido por un motor de c.c. dependerá por supuesto, de la intensidad del flujo magnético producido por los polos inductores y de la intensidad del flujo de inducido. Por consiguiente, el par ejercido por un motor puede incrementarse aumentando la intensidad de su campo inductor o aumentando la corriente del inducido, o haciendo ambas cosas a la vez.

La potencia mecánica producida por un motor de C.C. en HP, es proporcional al producto de su par motor por su velocidad. Cuando mayor sea la velocidad a que funcione el motor, mientras conserve el mismo par, tanto mayor será su potencia en HP. Los motores de C.C. en velocidades nominales elevadas producirán la misma potencia en HP con inducidos y armazones más pequeños que los de los motores de velocidades reducidas. Por consiguiente, el costo de los motores de gran velocidad por HP es mucho menor. Una armazón de un motor de 5HP a 900 r.p.m. podría servir para un motor de 10HP a 1800 r.p.m.

$$P = \tau \omega$$

En donde:

P es potencia

T es par

$\omega$  es velocidad angular en rad/s

$$\tau = \frac{7.04P}{n} \quad \text{En Lb-pie}$$

En donde:

n es la velocidad del motor en r.p.m.

p es la potencia del motor en Watts

## 7.14 Regulación y Control de La Velocidad de Los Motores de Corriente Continua

Al referirse a las características y al funcionamiento de los motores eléctricos, se emplean frecuentemente los términos regulación de la velocidad y control de la velocidad. Estos términos tienen significados completamente distintos y es muy importante distinguirlos.

La regulación de la velocidad se refiere a los cambios en la velocidad hechos automáticamente por el mismo motor, cuando varía la carga aplicada a la máquina. La regulación de la velocidad depende en gran parte de la construcción del motor y sus devanados, y es un factor muy importante en la elección de los motores para diferentes clases de trabajo. La regulación de la velocidad de un motor suele expresarse en forma de porcentaje o tanto por uno, y se refiere a la diferencia entre las velocidades de la máquina en vacío y en plena carga. En tanto por uno puede determinarse por medio de la fórmula siguiente:

$$\text{Regulación de la velocidad} = \frac{\text{R.P.M. sin carga} - \text{R.P.M. a plena carga}}{\text{R.P.M. a plena carga}}$$

Por ejemplo, si tenemos un motor que funcione a 1800 r.p.m. cuando no tiene conectada ninguna carga y su velocidad desciende a 1720 r.p.m. cuando marcha a plena carga su regulación de velocidad sería:

$$\text{Regulación de la velocidad} = \frac{1800 - 1720}{1720} = 0.046 = 4.6\%$$

La regulación de la velocidad del motor es enteramente automática y la realiza el mismo motor cuando varía la carga.

La regulación de velocidad de los motores shunt es excelente, ya que la intensidad de su campo magnético inductor permanece prácticamente constante y mientras se les aplique el voltaje de línea correcto mantendrán una velocidad prácticamente constante con amplia variación de la carga.

La velocidad de los motores shunt disminuirá algo, por supuesto, cuando aumente la carga; pero tan pronto como se reduce la velocidad del inducido, aunque sea ligeramente, se reduce el contravoltaje engendrado e inmediatamente admite el paso de más corriente por el inducido, aumentando así el par motor y manteniendo aproximadamente la misma velocidad.

La velocidad de los motores shunt no debe variar de ordinario más del 3 al 5 por ciento entre la marca en vacío y la marca a plena carga. las curvas que ilustran la regulación de velocidad de los motores shunt, serie y compound. se observará que la velocidad del motor shunt sólo disminuye muy suavemente cuando aumenta la carga.

La regulación de la velocidad del motor serie es muy defectuosa, porque su velocidad varía en razón inversa de la carga aplicada. Cualquier aumento en la carga refuerza el flujo magnético inductor del motor serie. Este da lugar a un contravoltaje más elevado y momentáneamente reduce la corriente de inducido, hasta que la velocidad del motor baje lo suficiente para que el contravoltaje vuelva a su valor normal, o aun valor inferior al normal, para permitir el paso de la corriente más intensa requerida por la carga adicional.

Si se suprime una parte de la carga aplicada a un motor serie, disminuye la intensidad de la corriente que pasa por el motor y se debilita su campo magnético. Este campo magnético más débil desarrolla menos contravoltaje momentáneamente permite pasar más corriente, hasta que la velocidad aumenta lo suficiente para elevar de nuevo el contravoltaje algo por encima del valor normal, disminuyendo la intensidad de la corriente.

Por consiguiente, el motor serie funcionara a velocidades muy elevadas cuando la carga es ligera y si la carga se desconecta por completo adquirirá una velocidad

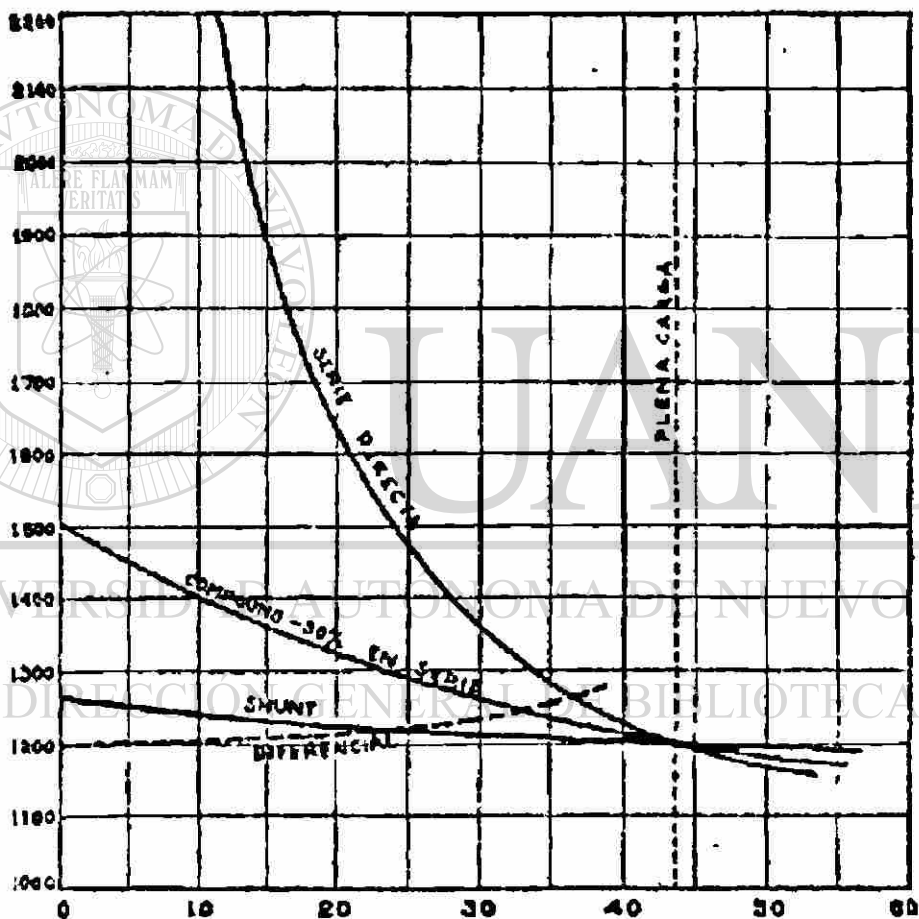


Figura 82 Curvas de velocidad de motores

excesiva. Por esta razón, no deben funcionar nunca los motores en serie sin carga, pues la velocidad podría aumentar hasta el punto de que la fuerza centrífuga destruyera el inducido, lanzándolo fuera.

El término control de velocidad se refiere a los cambios que se hace en la velocidad de un motor empleando aparatos de control manuales o automáticos. Estos aparatos para controlar la velocidad suelen ser exteriores al motor y consisten en una resistencia variable o en un driver electrónico.

$$n = \frac{V_T - I_a R_a}{I_F}$$

En donde:

N = velocidad del motor

$V_T$  = voltaje en terminales

$I_a$  = Corriente de armadura

$R_a$  = Resistencia de armadura

$I_F$  = corriente de campo

### 7.15 Arranque de Los Motores de Corriente Continua

Todos los motores electricos, cuando están en marcha, desarrollan una f.c.e.m. de rotación. Esta f.c.e.m., junto con la caída por impedancia debida a la corriente, equilibra continuamente la tensión aplicada. Puesto que la f.c.e.m. no existe en reposo, la tensión aplicada es equilibrada solo por la caída de la impedancia. Si se aplica la tensión nominal en reposo, pueden circular corrientes excesivas que dañen el motor. Esta corriente excesiva puede causar además una gran fluctuación de tensión en las líneas. Un par excesivo o una aceleración demasiado rápida también pueden dañar la carga. Para limitar el valor, y a veces la intensidad de arranque, muchas instalaciones de motores necesitan un dispositivo de arranque. Generalmente, este dispositivo reduce la tensión aplicada a los bornes del motor durante el periodo de arranque y controla el tiempo empleado en la aceleración, ya sea manual o automáticamente. La N.E.M.A. define un dispositivo de arranque como un controlador diseñado para controlar un motor hasta su velocidad normal en un sentido de rotación. Y un controlador Electrico como un dispositivo o conjunto de dispositivos que sirven para gobernar, en una forma predeterminada, la potencia eléctrica suministrada al aparato al cual esta conectado. Todos los motores de c.c. por encima de 2 H.P. requieren un dispositivo de arranque para reducir la tension del inducido. Los motores de potencia fraccionaria no requieren generalmente ningún dispositivo para regular la tensión.

En donde:

$$I_a = \frac{V_T - E_c}{R_a}$$

$I_a$  = Corriente de armadura

$V_T$  = Voltaje en terminales

$E_c$  = Voltaje contraelectromotriz

$R_a$  = Resistencia de armadura

$$E_c = K\phi\eta$$

Aquí se puede ver que el voltaje contraelectromotriz depende del flujo del devanado de campo y de la velocidad del motor, es por eso que a velocidad cero (arranque) el  $E_c = 0$

Por esta razón, cuando se ponen en marcha los motores de c.c. salvo los de potencia muy pequeña, es necesario poner alguna resistencia en serie con el inducido para limitar la corriente hasta que la máquina adquiere su plena velocidad. A medida que el motor va aumentando su velocidad, el contravoltaje va siendo cada vez mayor, hasta que limita la corriente de modo que la velocidad del motor no puede seguir aumentando. En este punto, es decir, cuando se alcanza este límite de la velocidad, la diferencia entre el contravoltaje y el voltaje de línea puede ser solamente de unos cuantos volts incluso en los motores de voltaje muy elevado.

### 7.16 Pruebas de Motores al Freno

De cuando en cuando, puede ser conveniente comprobar el freno la potencia de un motor con el fin de averiguar su rendimiento o el estado en que se encuentra. Esto puede hacerse reglando un freno para que aplique la carga a la polea del motor y medir así el par ejercido por éste. Tal procedimiento para medir la carga de los motores se llama ensayo al freno de Prony.

La Figura 83 muestra la instalación y el método para realizar la prueba. El freno puede hacerse con dos bloques de madera cortados en forma que se adapten a la polea y provistos de dos pernos con tuercas de mariposa que permiten ajustar la tensión aplicada a los bloques puestos sobre la polea. Puede unirse a los bloques un brazo o una barra, de metal o madera, a la que se adapta un perno o tornillo de ojo para enganchar el extremo de la barra a una báscula o un dinamómetro. Puede emplearse un dinamómetro con escala, o bien puede hacerse que el perno del extremo del brazo descansa sobre la plataforma de una báscula.

El brazo o la palanca del freno debe tener una longitud como de 50 cm o un metro, esto es, una cifra redonda, que permita simplificar los cálculos. La longitud del brazo se mide desde el centro del eje hasta el punto en que se une el dinamómetro o el punto en que se hace el contacto con la báscula.

Con un dispositivo de esta clase puede aplicarse gradualmente carga al motor apretando los tornillos de las zapatas del freno hasta que el motor funcione a plena carga.

Puede ponerse un amperímetro en serie con uno de los conductores de línea del motor para determinar cuándo la máquina está cargada a su capacidad nominal de corriente. En el caso de que se emplee un amperímetro, debe usarse también un voltímetro, para ver si se aplica el voltaje de línea correcto al motor en el momento de la prueba. Puede emplearse un wattmetro, en lugar del voltímetro y el amperímetro, si se desea.

Una vez que se ha ajustado el freno de modo que el motor esté soportando su plena carga nominal en vatios, debe leerse la tensión en kilogramos que marca el dinamómetro y anotarse minuciosamente la velocidad del motor en revoluciones por minuto.

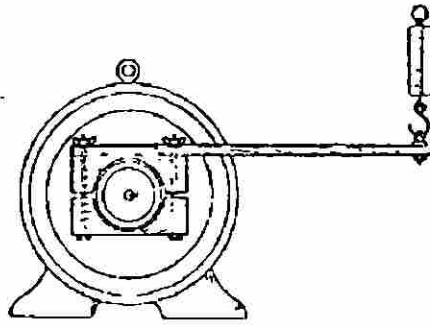


Figura 83 Freno Prony

El ajuste del freno debe mantenerse de modo que el motor ejerza la misma tracción sobre el dinamómetro y absorba la misma carga en vatios durante todo el tiempo que se esté verificando la velocidad.

La velocidad del motor puede medirse fácilmente por medio de un cuentarrevoluciones aplicado al extremo de su eje mientras está en marcha. Para medir el tiempo con exactitud debe emplearse un reloj con segundero.

### 7.17 Cálculo de La Potencia en H.P.

La potencia de un motor es proporcional al producto de su par motor por su velocidad. Por consiguiente, si conocemos la longitud del brazo de palanca en metros, la tensión o tracción en kilogramos sobre el dinamómetro, y la velocidad del motor en r.p.m., podemos determinar fácilmente la potencia producida en HP aplicando la sencilla fórmula siguiente:

$$\text{HP} = \frac{2 \times \pi \times \text{r.p.m.} \times P \times L}{4500}$$

en la cual:

HP = potencia en caballos desarrollada por el motor

$\pi = 3.1416$ , o sea, la razón de la circunferencia al diámetro de un círculo.

( $2 \times \pi = 6.28$ )

P = velocidad del motor en revoluciones por minuto

r.p.m. = tensión que marca el dinamómetro, en kilogramos

L = longitud del brazo, en metro

4500 = número de kilogramos necesarios por minuto para un HP

Como ejemplo, supongamos que hemos hecho una prueba en un motor usando un brazo de palanca en el freno de 0,50 m de largo y hemos visto que cuando el motor está completamente cargado, según los instrumentos eléctricos, aplica un tensión de 5 Kg en el extremo del brazo y gira a la velocidad de 1500 r.p.m. Por consiguiente, según nuestra fórmula, se tendrá:

$$\frac{6.28 \times 1500 \times 5 \times 0.50}{4500} = 5.23\text{HP}$$

## 7.18 Pruebas de Rendimiento

El rendimiento de un motor es, por supuesto, un detalle importante, sobre todo cuando se trata de elegir una gran número de motores para impulsar en marcha continua cierta maquinaria. Cuanto más elevado sea el rendimiento de un motor, tanto mayor será la potencia en HP que producirá con una cantidad dada de energía eléctrica en watts, y tanto menor será la potencia desperdiciada en la forma de pérdidas dentro de la máquina.

Esas pérdidas son en parte mecánicas, como el rozamiento en los cojinetes y el rozamiento del inducido con el aire que le rodea cuando gira a gran velocidad. Son también en parte eléctricas, como las pérdidas en el devanado del inducido, y en los arrollamientos inductores debidas a su resistencia y al hecho de que una cierta cantidad de energía se transforma en calor y también las ligeras pérdidas magnéticas producidas por la histéresis y las corrientes parásitas.

El rendimiento de un motor cualquier puede hallarse dividiendo su potencia de salida entre la potencia de entrada en watts.

potencia en HP	a ½ carga	a ¾ carga	a plena carga
5	73%	78%	80%
10	79%	82.5%	85%
25	84%	87%	87.5%
50	85%	87.5%	88.5%
200	87%	89%	91.5%

Tabla 9 Rendimiento De Motores "Compound" De C.C., De 230 Volts

## 7.19 Devanados de Armadura

### Arrollamientos de Inducido.

El inducido típico de corriente continua consiste en un núcleo cilíndrico, formado por chapas de acero, ranurado a lo largo de su periferia externa para la recepción del devanado de dos capas que sirve de asiento a la fuerza electromotriz inducida, y que conduce la corriente productora del par. Consta de un conjunto de conductores conectados entre si de tal manera que este inducido gira por reacción contra el campo inductor.

### Devanado Bipolar.

Es el sistema mas sencillo para conectar los conductores o bobinas del inducido. Cada bobina consta de dos lados y dos cabezas, llamandose lado de bobina a la parte de la bobina que queda bajo el polo inductor y cabeza de bobina a la parte de la bobina que une entre si dos lados de bobina.



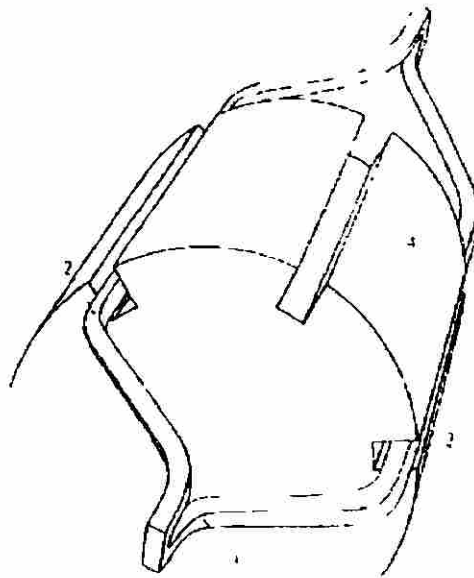


Figura 84 Devanado de armadura

#### Devanado Multipolar.

En estos devanados deben adaptarse a sus características constructivas de tal forma que cada bobina (es decir, las dos cabezas de bobina y los dos lados de bobina) han de envolver el flujo de un par de polos o sea, que ambos lados de bobina han de ocupar la misma posición respecto a dos polos contiguos.

#### Devanado Imbricado.

Las conexiones de las bobinas que constituyen un devanado de corriente continua, pueden realizarse de dos maneras. En una de ellas, las bobinas están conectadas hacia atrás, o sea, recogiendo todos los conductores que corresponden a un par de polos. Estos devanados se llaman imbricados y en ellos, las bobinas tienen forma de lazos. Este devanado es muy usado en motores ya que tiene la propiedad de producir mas corriente que voltaje.

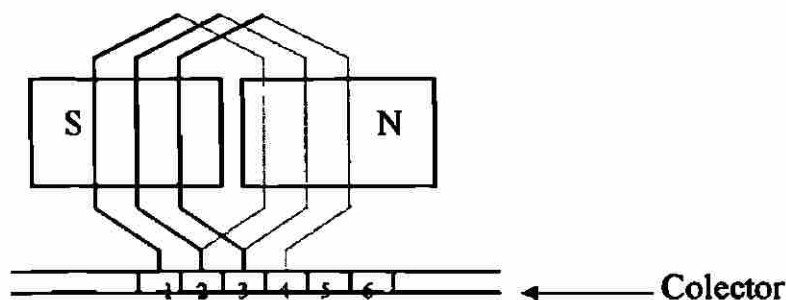
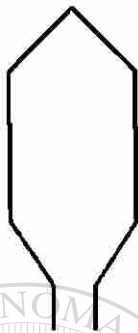


Figura 85 Ejemplo de Devanado Imbricado.

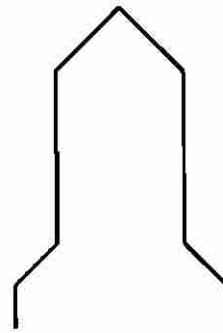
### Devanado Ondulado.

Otra forma de conexión de las bobinas es hacia adelante, o sea que cada bobina pasa sucesivamente, por todos los polos. En ellos las bobinas tienen la forma de ondas.

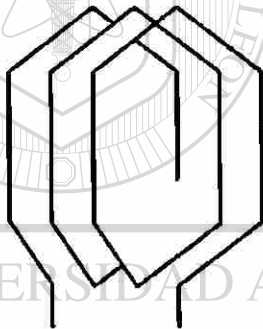
El paso de colector de un devanado ondulado difiere de un paso polar en  $m$  segmentos, porque, de otra forma, el devanado se cerraría sobre si mismo después de atravesar solamente  $p/2$  bobinas.



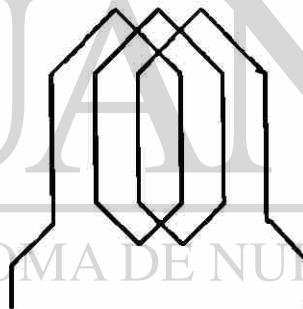
Forma de las bobinas en un devanado imbricado



Forma de las bobinas en un devanado ondulado



Bobina de 3 espiras para devanado imbricado.



Bobina de 3 espiras para devanado ondulado.

**Figura 86** Formas de los devanados de armadura

## 8. MAQUINAS SINCRONICAS

### 8.1 Introducción

Ahora toca el turno a las maquinas de corriente alterna llamadas sincrónicas y toman ese nombre porque su velocidad esta asociada directamente con la frecuencia del voltaje de la línea de c.a.

$$\omega_s = \frac{\omega_e}{P/2} = \frac{2\pi f}{p/2} \text{ rad / s}$$

$$n_s = \frac{120 f}{p} \text{ r. p. m}$$

En donde:

$\omega_s$  es la velocidad angular sincrónica

$\omega_e$  es la velocidad angular del voltaje de la línea de c.a.

$f$  es la frecuencia del voltaje de la línea de c.a.

$n_s$  es la velocidad sincrónica en r.p.m.

Como otras maquinas eléctricas las maquinas sincrónicas operan ya sea como motores o como generadores. A una maquina sincrónica polifásica que actúa como generador se le llama alternador, las maquinas eléctricas más grandes del mundo son alternadores sincrónicos como por ejemplo las usadas por la C.F.E. para generar la electricidad en el país.

Algunas tienen potencias específicas de tanto como 1700 millones de watts (1700 Mwatts), aunque están diseñadas para trabajar como generadores algunas veces las hacen de motores si se presentan condiciones anormales en el sistema.

Muchas maquinas sincrónicas polifásicas se diseñan para trabajar como motores. Una armadura de motor sincrónico no solo necesita y recibe corriente alterna de la barra de distribución, sino también, como cualquier dinamo de c.c. necesita una excitación de c.c. para su campo. Debido a la posibilidad de variación de excitación de campo, el motor sincrónico de c.a. posee una característica que ningún otro motor de c.a. tiene, que el factor de potencia al cual funciona se puede variar a voluntad.

Los motores sincrónicos son muy usados como capacitores para la corrección del factor de potencia en las grandes industrias.

Una segunda característica de los motores polifásicos y monofásicos sincrónicos es que no tienen arranque propio de inherente. Como el alternador de c.a. se los debe

acelerar hasta su velocidad mediante algún método auxiliar y conectar entonces a la línea.

Otra peculiaridad de los motores sincrónicos es su susceptibilidad a la fluctuación de penduleo u oscilación, en especial cuando las cargas están sujetas a troquelados, cizallas, compresoras o bombas recíprocas. El empleo de devanados amortiguadores en la fabricación de los rotores ha puesto término a este problema, ha hecho posible que el motor síncrono tenga arranque propio, durante el periodo del arranque.

En la actualidad se emplea ampliamente el motor síncrono y su popularidad nunca ha sido mayor, los motores polifásicos sincrónicos tienen las siguientes ventajas específicas sobre los polifásicos de inducción:

- Los motores síncrónicos se pueden emplear para la corrección del factor de potencia. Además de suministrar el par necesario para impulsar sus cargas.
- Son más eficientes, cuando se trabajan a factor de potencia unidad, que los motores de Inducción de potencia y voltaje nominales correspondientes.
- Los rotores de polos de campo de los motores síncrónicos pueden permitir el empleo de entrehierro más anchos que los diseños de jaulas de ardillas que usan en los motores de inducción.
- Pueden ser más baratos para la misma potencia, velocidad y voltaje nominales.

## 8.2 Construcción de la Máquina Síncrona.

La construcción de una máquina síncrona de c.a. es la misma para el motor que para el generador. El estator tiene un devanado monofásico o polifásico. El rotor se puede construir de polos salientes o de rotor cilíndrico. La mayor parte de los rotores son de polos salientes con es de polos salientes, excepto en los motores de muy alta velocidad, que emplean el rotor cilíndrico.

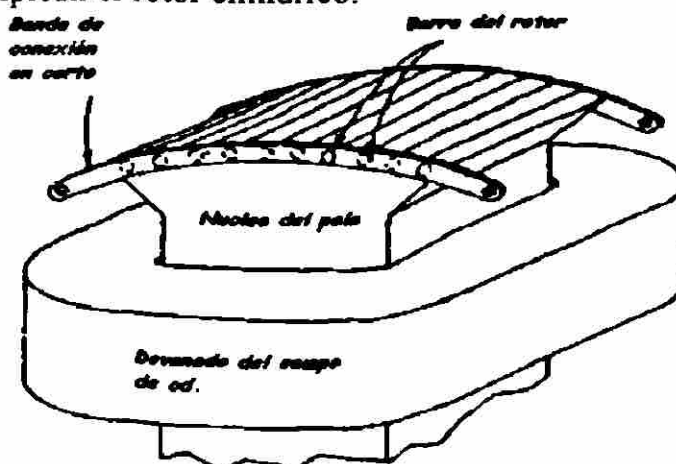


figura 87 Polo de una dinamo síncrona

Para eliminar la oscilación y desarrollar el par necesario de arranque, los polos del rotor contienen conductores de caras polares que se conectan en cortocircuito en sus extremos, como se muestra en la figura. Este devanado amortiguador consiste en barras macizas de cobre embebidas en la superficie de la cara polar y conectadas en cortocircuito mediante una banda, asemejando el devanado jaula de ardilla que se utiliza en los motores de inducción.

### 8.3 Funcionamiento del Generador Sincrónico

En un generador sincrónico debe de alimentarse el devanado del rotor con corriente continua, la cual produce un campo magnético giratorio dentro del generador, el cual a su vez induce un sistema de voltajes trifásicos en los arrollamientos del estator.

Esencialmente el rotor de un generador es un gran electroimán, los polos como se dijo anteriormente pueden ser salientes o no salientes (rotor cilíndrico), el termino saliente significa protuberante y significa que sobresale de la superficie del rotor. Por otra parte el polo no saliente es uno construido al ras de la superficie del rotor. Los rotores cilíndricos se emplean para dos o cuatro polos, mientras que los de polos salientes se emplean para mas de cuatro polos. Como el rotor esta sujeto a campos magnéticos variables deberá de construirse con laminaciones para reducir las perdidas por corrientes parásitas.

Debe de suministrarse alimentación de c.c. al circuito de campo del rotor. Como el rotor esta en movimiento, es necesario adoptar construcciones especiales, con el fin de suministrar la energía al campo.

Las dos soluciones más comunes son:

- Suministrar la energía de c.c. al rotor desde la fuente externa, por medio de anillos rozantes y escobillas.
- Proveer la energía de c.c. por medio de una fuente especial llamada excitatriz, que es un generador de c.c. montado sobre el mismo eje de la maquina sincrónica y que aprovecha el movimiento de esta para generar la energía de c.c.

Los anillos rozantes son aros metálicos que rodean al eje de la maquina, pero aislados del mismo eje. Cada extremo del arrollamiento del motor esta conectado a un anillo y sobre cada anillo hace contacto una escobilla. Si alas escobillas se conectan las terminales positiva y negativa de la fuente, en todo momento quedara aplicado el mismo voltaje al arrollamiento del campo, sin importar la velocidad angular ni la posición del rotor.

La combinación de anillos rozantes y escobillas causa algún problema en las maquinas sincrónicas debido a que aumentan las exigencias de mantenimiento de la maquina por la periodicidad con que debe de revisarse el estado de desgaste de las escobillas. Adicionalmente, la caída de voltaje en las escobillas puede ser causa de considerables perdidas de potencia en maquinas con altas corrientes de campo. A pesar

de esto se emplean los anillos rozantes con escobillas debido a que es el método funcional menos costoso de suministrar corriente de campo.

El voltaje generado interno en esta maquina depende de la velocidad de rotación de su eje y de la magnitud del flujo de campo. El voltaje de fase de la maquina difiere del voltaje generado debido a los efectos de resistencia de armadura y a las resistencia y reactancia interna del devanado de armadura, el voltaje terminal del generador podrá ser igual al voltaje de fase o podrá estar relacionado con este dependiendo como este conectada la maquina en delta o en estrella.

#### 8.4 Funcionamiento del Motor Sincronico.

El motor sincrónico no tiene arranque propio inherente, no arranca por si mismo sino que necesita de un devanado amortiguador para el arranque, este devanado se desconecta automáticamente cuando el motor gira a la velocidad sincrónica.

El devanado de armadura consiste en muchas bobinas en serie, en cada fase de una dinamo sincrónica polifásica de c.a. La corriente trifásica en los conductores de armadura del estator produce un campo magnético uniforme giratorio, cuya velocidad de rotación es de  $n_s = 120 f / P$ .

Si se coloca una carga en el eje de un motor sincrónico, el par de resistencia creado por dicha carga hará que el rotor se desacelere o "se siente" momentáneamente, pero continuara girando a la misma velocidad con respecto al campo rotatorio del estator.

La velocidad del rotor, sigue siendo la velocidad sincrónica con respecto al campo rotatorio, pero el flujo del rotor o el flujo mutuo del entrehierro se reduce un poco, debido a la mayor reluctancia del entrehierro. Si el par contrario es tan grande que es mayor que el par máximo que se puede desarrollar y si el rotor "se desliza" fuera de sincronismo, se detendrá el motor. Por la anterior, un motor sincrónico trabaja a la velocidad sincrónica o no trabaja.

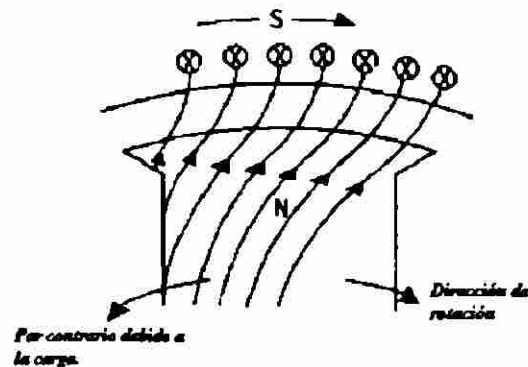
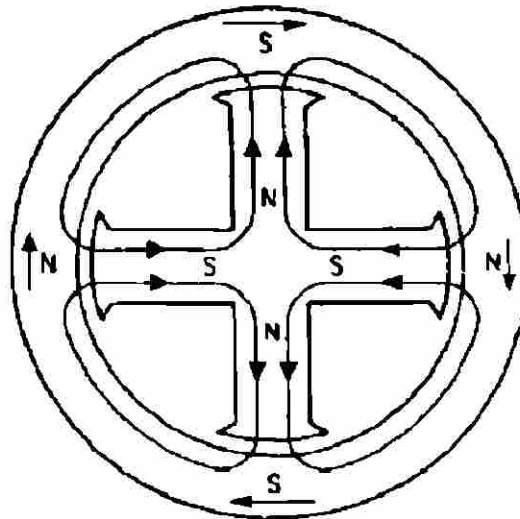


Figura 88. Efecto de carga sobre la obstrucción del flujo.



**Figura 89** Campo rotatorio del estator con respecto al rotor

## 8.5 Arranque de Motores Síncrónicos.

El motor síncrono se debe acelerar a una velocidad suficiente cercana a la síncrona para asegurar su sincronismo con el campo rotatorio. Los medios por los cuales se aceleran a la velocidad necesaria son:

- Un motor de c.c acoplado al eje del motor síncronico.
- Mediante el generador de excitación del campo como motor de c.c.
- Con un motor pequeño de inducción que tenga al menos un par de los polos menos que el motor síncrono.
- Por medio de devanados de amortiguación, como los del motor de inducción de jaula de ardilla.

El primero de los métodos se usa a veces en los laboratorios con motores síncrónicos que no estén equipados con devanados amortiguadores. Pero para llevar a sincronismo el motor, se hace trabajar el generador de c.c. como motor y la dínamo síncrona de c.a. se sincroniza con el suministro de ca como alternador una vez en paralelo con el suministro, la dínamo síncrona trabaja como motor.

El segundo método, empleado es igual que el primero excepto que el motor excitado síncrono, que es un generador derivación c.c. se hace trabajar como un motor y la dínamo síncrona de c.a. se sincroniza con el suministro de c.a.

El tercer método, empleando un motor auxiliar de inducción con menos polos implica menos procedimiento de sincronización para el motor síncrono de c.a. para un alternador. Se necesita que el motor de inducción tenga como mínimo un par de polos menos para compensar la pérdida de velocidad que tiene ese motor debido al deslizamiento.

En los tres métodos que acabamos de describir, es necesario que haya poca o ninguna carga en el motor sincrónico y que la capacidad del motor de arranque, de c.a. o c.c. sea de entre 5 y el 10 por ciento de la capacidad nominal del motor sincrónico acoplado en él.

Sin embargo, el método que con mucho se emplea mas para arrancar un motor sincrónico como un motor de inducción usando los devanados amortiguadores. Este método es el más sencillo y no se requiere maquinas auxiliares especiales.

## 8.6 Arranque de un Motor Sincronico como Motor de Inducción mediante sus Devanados Amortiguadores.

En la figura de abajo se puede observar que la banda que se conecta en corto circuito a las barras del rotor tiene agujeros. De esta modo, se forma un motor complejo de jaula de ardilla y aunque las barras no tienen la capacidad para conducir continuamente la carga nominal del motor sincrónico como motor de inducción basta poner poca carga.

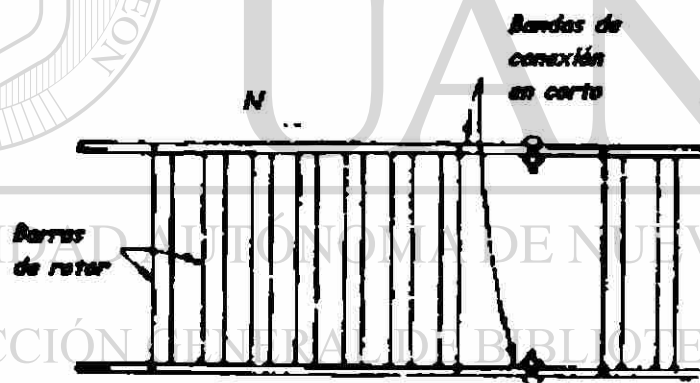


Figura 90 Devanado amortiguador de jaula de ardilla o arranque.

Cuando se arranca los motores sincrónicos extremadamente grandes, como motores de inducción, se emplean varios métodos para reducir la corriente de arranque que se toma de la barra de distribución.

Se acostumbra a conectar en corto circuito el devanado del campo de c.c. durante el periodo de arranque entonces, cualquier voltaje y corriente que se induzcan en el, pueden ayudar a que el devanado amortiguador produzca acción de motor. En los motores sincrónicos extremadamente grandes se usan interruptores de seccionalización de campo, o de división de campo, para conectar en cc los devanados individuales de campo y evitar la suma acumulativa de los voltajes inducidos de polo a polo.

Entre las ventajas que tiene los motores sincrónicos sobre los de inducción esta el hecho de que el entrehierro de un motor sincrónico es mejor. Por esta razón, el devanado de inducción del rotor crea en el arranque una relación bastante alta de la reactancia con la



resistencia del rotor. Aunque esto pueden ocasionar que se desarrollen mayores corrientes de arranque y menores factores de potencia para alcanzar el mismo par, o aun un par menor se mejora la velocidad de deslizamiento sin carga del motor síncronico. Así, cuando se quita el corto circuito del devanado de campo y se aplica c.c. al devanado de campo en el rotor, a velocidad igual o cercana a la síncrona, el rotor entra fácilmente en sincronismo con el campo rotatorio del estator.

En resumen cuando se arranca un motor síncronico sin carga, con sus devanados amortiguadores sé:

- pone en corto el devanado de campo de c.c. , y se aplica al estator, con lo cual el motor alcanza la velocidad sin carga o en vacío como motor de inducción.
- aplica corriente directa al devanado de campo y la corriente de campo se ajusta para dar una corriente mínima alterna de línea.
- acopla la carga con el eje del motor.

### 8.7 Arranque de un Motor Síncronico con Carga.

El motor síncronico arranca y trabaja a la velocidad síncrona, mediante sus devanados amortiguadores tipo inducción. Para desarrollar una velocidad cercana a la síncrona, el devanado de jaula de ardilla del motor de inducción necesita tener baja resistencia y alta reactancia .

Estas últimas características producen un bajo par de arranque en un motor de inducción para la misma corriente de armadura, esos pares son aproximadamente del 30 al 50 por ciento del par de plena carga, por ejemplo en ventiladores o compresores de aire, cuyas cargas están en función de su velocidad, se pueden tolerar esos pares aplicados.

Se puede mejorar el par de arranque de las barras de jaulas de ardillas del rotor síncronico mediante el empleo de aleaciones de alta resistividad en las barras. Esto no lleva al rotor a una velocidad tan cercana a la síncrona como con rotores de baja resistividad, debido a que aumentan el deslizamiento a causa de la alta resistencias. Si se abre el campo durante un instante y se le pone en corto inmediatamente antes de conectar la corriente directa para asegurar el sincronismo.

El amortiguador devanado de fase se reconoce inmediatamente debido a que emplea cinco anillos rozantes, dos para el devanado de campo con c.c. y tres para el devanado de c.a. conecta en estrella. El rendimiento de arranque del devanado, se emplea una resistencia externa de arranque para mejorar el par de arranque.

El motor se pone en marcha con toda la resistencia externa por fase, como y se pone en corto circuito en el campo. El motor se acerca a la velocidad síncrona a medida que se reduce la resistencia de arranque y cuando se aplica el voltaje de c.c. del campo, el motor se asegura en sincronismo.

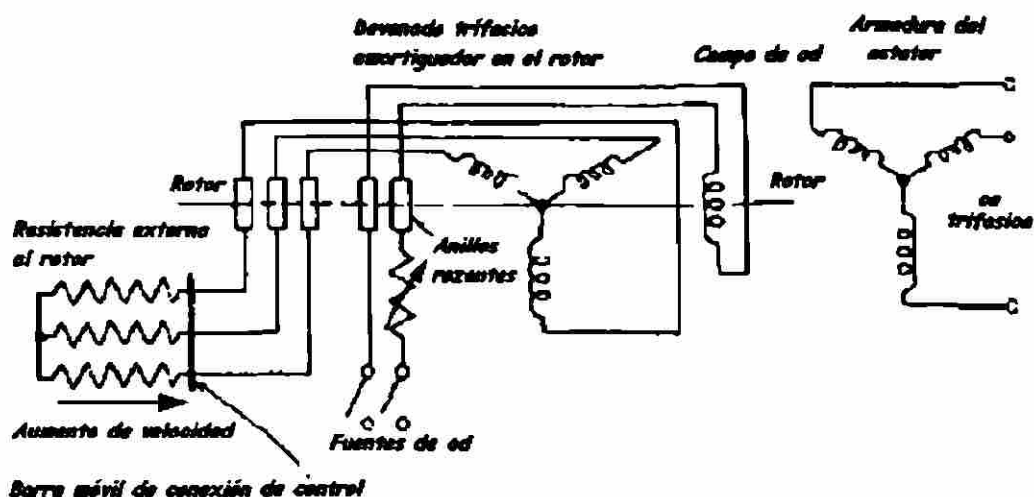
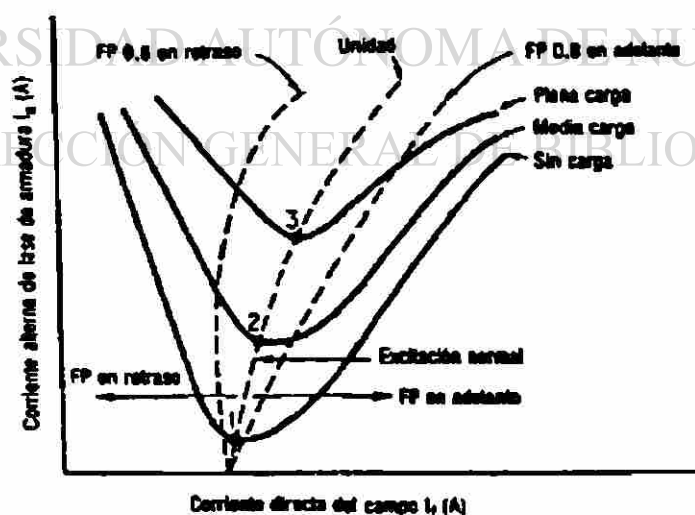


Figura 91 Conexión de resistencias para el arranque de un motor sincrónico

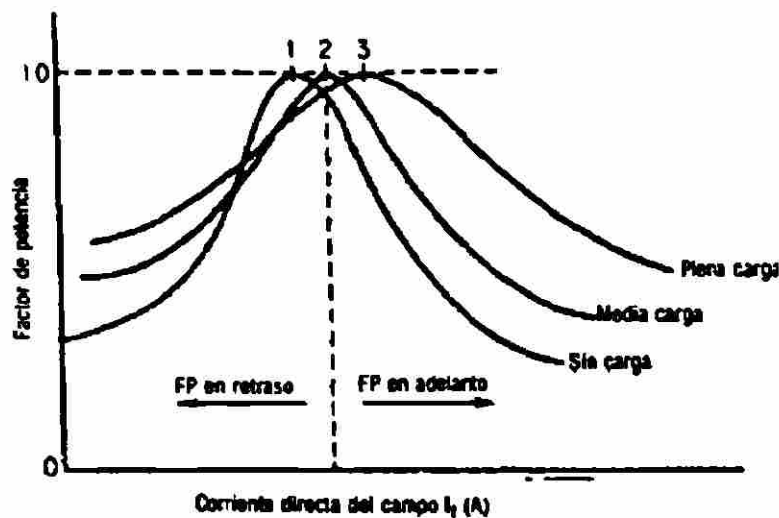
## 8.8 Curvas "V" para un Motor Sincrónico.

Las relaciones fasoriales se pueden resumir en forma gráfica en la figura 92, en forma experimental en el laboratorio, con el dispositivo que se muestra en la figura 94. Cuando la corriente de campo de un motor se reduce, se produce una corriente de armadura  $I_a$  en retraso, cuando el motor está sobreexcitado, la corriente de armadura también aumenta y supera la corriente necesaria de excitación normal para desarrollar el par requerido de cualquier carga dada.



a. Relación entre corriente de armadura y corriente de campo para varias cargas

Figura 92 Curvas "V" del motor sincrónico



b. Relación entre el factor de potencia y la corriente de campo para varias cargas

Figura 93 Familia de curvas de factor de potencia contra corriente de campo para un motor síncronico

Aplicando una carga constante determinada al eje de un motor síncronico haciendo variar la corriente de campo de sobreexcitación y registrando a cada etapa la corriente de armadura se obtienen las curvas de la figura 93.

Las conexiones de los wattmetros que se muestran en la figura 94 también darán el factor de potencia de cada armadura y de campo en cualquier condición dada de carga.

Cada una de las curvas de la familia tendrán un desplazamiento a la derecha a medida que se aumente la carga a una carga mayor. Así las curvas V muestran los diagramas fasoriales y viceversa para distintas condiciones de carga y factor de potencia.

Las curvas "V" también verifican un punto básico, en el cual se demostró que, si se hace variar la excitación de cualquier valor determinado de la carga mecánica aplicada, se debe cambiar el ángulo del par de tal modo que  $V_p I_a \cos \theta$ , la potencia desarrollada por fase, permanezca igual. Si disminuye la excitación desde el punto 2 de la figura 93, la carga disminuye y desarrolla menos potencia. El ejemplo siguiente que, si se supone constante el ángulo del par, el aumento en la excitación ocasiona una potencia desarrollada mayor, a un factor de potencia más adelantado.

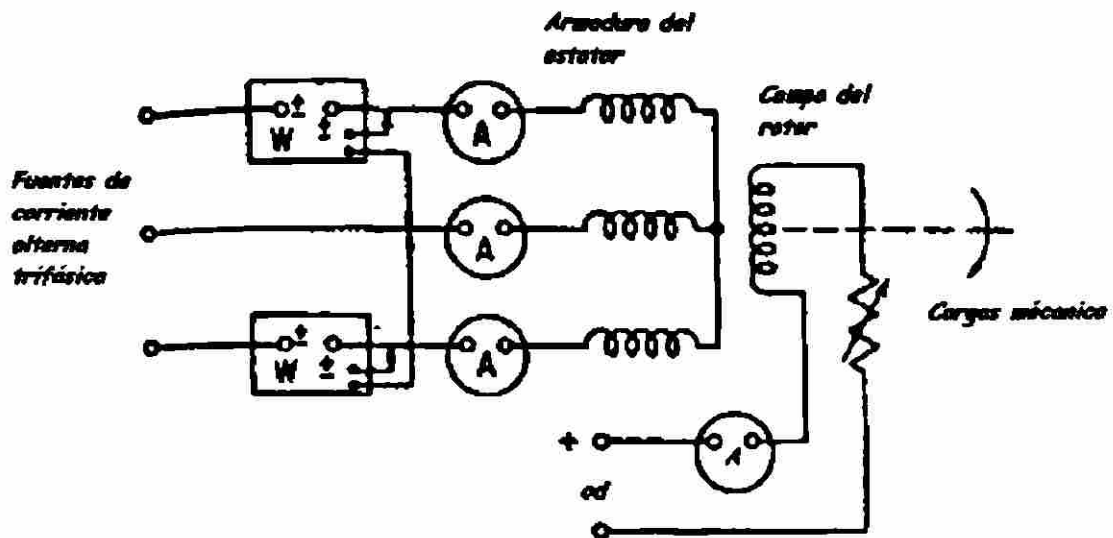


Figura 94 Conexiones para obtener las curvas "V" en el laboratorio

## 8.9 Capacidad de Motores Sincrónicos contra Especificaciones de Factor De Potencia

Los motores sincrónicos comerciales pueden comprarse en tres especificaciones normales de factor de potencia: FP uno, FP 90 por ciento en adelanto y FP 80 por ciento en adelanto.

— Al comparar los tamaños de armazón de la misma potencia, voltaje, y velocidad, se podría decir que el tamaño de armazón de un motor sincrónico de 100 hp, FP 1.0, es menor que uno de FP 0.8 en adelanto, de a que el FP unidad tiene especificada una corriente de plena carga igual al 80 por ciento de la de un motor con FP 0.8 en adelanto. Ambos motores son capaces de entregar 100 hp en sus ejes de salida. Pero el motor con menor factor de potencia entregara 100 hp y al mismo tiempo se puede ajustar para tomar una corriente nominal a un FP igual al 80 por ciento en adelanto. Si se aumenta la corriente de excitación a plena carga de uno hasta FP 80 por ciento en adelanto, se debe aumentar la corriente de armadura.

En resumen los motores sincrónicos con FP en adelanto, de la misma capacidad de potencia que los que tiene FP unidad, deben tener una mayor capacidad de potencia a plena carga, por lo cual necesitan una armazón de mayor tamaño.

## 8.10 Capacitores Sincrónicos

Se fabrican deliberadamente varios motores sincrónicos especializados sin ejes de salida. Se utilizan únicamente para corrección de factor de potencia. No son capaces de impulsar carga mecánica alguna. Pero se debe hacer notar que cualquier motor

sincronico sobreexcitado que no se usa para impulsar carga alguna se puede clasificar como capacitor sincronico o condensador sincronico.

Aunque no haya carga mecánica en un motor sincrónico que contribuya a la corriente de armadura, las curvas V muestran que cuando se sobreexcitan, aun en vacío, la corriente de armadura del estator es alta.

Se prefieren los capacitores sincrónicos para corregir el factor de potencia en vez de los capacitores comerciales. Los primeros pueden fabricarse a un costo mucho menor para capacidades de KVA (aun de MVA) extremadamente altas, así como para altos voltajes de 100 a 800 kV., en comparación con los capacitores comerciales fijos de la misma capacidad de voltaje y KVA.

### 8.11 Ventajas y Limites Económicos de La Corrección del Factor de Potencia.

Las cargas que tienen factores de potencia de moderados a bajos en adelanto y en retraso menores de 0.9, ocasiona una pérdida de energía eléctrica de la compañía de servicio. Se mantienen al mínimo los costos de esta capacidad mayor adicional mediante la corrección del factor de potencia.

También hay otras ventajas que se deben a esta corrección:

- Puesto que la capacidad de potencia y de la corriente de las líneas son menores ambas, se reducen las pérdidas de potencia en las líneas de transmisión ( $I^2R$ )
- Igualmente, se reduce la caída del voltaje en la línea debida a la impedancia entre sus conductores, facilitando la tarea de mantener constante el voltaje nominal que suministra la compañía a los consumidores.
- Aumenta la eficiencia de transmisión desde la fuente hasta la carga.
- Disminuyen los costos de la compañía de servicio, lo cual se refleja en ahorro para el consumidor.
- La corrección del factor de potencia consiste en arreglar cargas capacitivas en paralelo o las cargas inductivas existentes. Lo anterior tiene el efecto de reducir todo lo siguiente:
  - Potencia total en cuadratura; inductiva y reactiva ( $+j Q_t$ )
    - Potencia total compleja aparente ( $S_t$ )
    - Corriente total suministrada al sistema completo ( $I_t$ )

### 8.12 Métodos de Corrección o Mejoramiento del Factor de Potencia

La corrección o mejora del factor de potencia implica diferentes maneras de elevarlo. Los métodos consisten en conectar dispositivo entre los conductores, en

paralelo con las cargas inductivas existentes,  $+jQ$ , potencia negativa reactiva en cuadratura  $-jQ$ . Se usan en forma comercial tres tipos de dispositivos:

- **Capacitores de corrección.** Son capacitores comerciales grandes de alto voltaje y alta capacitancia, que se conectan entre las líneas de sistemas monofásicos y trifásicos. Los capacitores de corrección se especifican tanto en kVA, kilovars, como en voltaje, kV. Los capacitores comerciales de corrección se limitan a las capacidades menores de kVA y kv, en comparación de los dos tipos siguientes de dispositivos
- **Capacitores sincrónicos.** Son motores sincrónicos sobreexcitados diseñados sin ejes que sobresalgan, de modo que no se puedan acoplar a cargas mecánicas, y tienen por objeto “flotar” en las líneas trifásicas o monofásicas para tomar solo corriente en adelanto del suministro y corregir el factor de potencia. Sus capacidades se indican tanto en kVA como en kV.
- **Motores Sincrónicos.** Son motores de velocidad constante que cuando se sobreexcitan, son capaces de impulsar cargas mecánicas, simultáneamente, de tomar corriente del suministro que están en adelanto. Casi toda su capacidad en kVA se representa como  $-jQ$  kilovars de corrección.

### 8.13 Límites Económicos de Mejoramiento del Factor de Potencia.

Se acostumbra no tratar de corregir completamente el factor de potencia de un sistema hasta llegar al factor unidad. El hecho de que haya disponibles capacitores grandes de alta capacidad y de que, para la misma capacidad en kVA, sean menos costosos que los motores sincrónicos. Esto se debe a que se arranca y se hacen funcionar sin carga, con lo cual no se necesitan devanados toscos de jaulas y necesitan diámetros menores de ejes y rodamientos menos robustos.

El motivo económico que establece un límite de corrección máxima del factor de potencia se puede inferir con los datos de la tabla 11 para un sistema de 10,000 kVA

FP del sistema	Salida en kW	Kilovars disponibles	Kilovars por corregir del FP	Kilovars acumulados en la corrección
0.6	6000	8000	—	—
0.65	6500	7600	400	400
0.7	7000	7140	460	860
0.75	7500	6610	530	1390
0.8	8000	6000	610	2000
0.85	8500	5270	730	2730
0.9	9000	4360	910	2640
0.95	9500	3120	1240	4880
1	1000	0	3120	8000

**Tabla 11** Límites económicos para la corrección del factor de potencia

## 8.14 Motores Supersincronicos

El termino supersincronico no se refiere a que el motor gire a una velocidad arriba de la sincrónica. Este motor fue creado por General Electric para proveer un motor sincrónico que tuviera un arranque propio bajo altas cargas. El motor sincrónico de rotor simplex puede desarrollar pares entre 250 y 300 por ciento del par en plena carga.

El motor supersincrono es capaz de desarrollar un par motor sincrónico al arranque. Sin embargo, necesita una construcción especial y probablemente el motor más costoso de su tipo para determinar potencia.

El rotor es uno normal de jaula de ardilla con un devanado de c.c. que sale a anillos rozantes en el eje del rotor. El estator completo puede girar libremente en muñones del mismo modo que un dinamometro de c.a. El estator del motor supersincrono puede girar libremente sobre cojinetes a su velocidad sincrónica. El devanado de armadura en el estator se excita a través de anillos rozantes en general se arranca en voltaje reducido mediante un regulador trifásico o de inducción. Se tiene un freno grande alrededor del lado externo del armazón del estator para detener el movimiento.

Cuando se aplica un voltaje de c.a. polifásico al estator sin estar aplicado el freno, el par de motor de inducción que producen los polos del rotor reacciona contra los conductores del "estator" esta reacción imparte al estator un par que tiene la dirección contraria de giro de la carga. El estator se acelera a medida que se acelera a medida que aumenta el voltaje de c.a. en el estator.

## 8.15 Motores Especiales Sincrónicos que no emplean excitación de campo con c.c.

Hay tipos de motores sincrónicos que no emplean excitación de c.c. en el devanado de campo y se agrupan en dos categorías:

- Los motores sincrónicos no excitados, en los que no se tiene ninguna excitación del campo.
- Los motores de excitación de campo c.a. o "sincromotores".

## 8.16 Motores Sincrónicos de Inducción.

Este motor se creó debido a la demanda de un motor sincrónico polifásico con arranque propio en tamaños, menores, de menos de 50 hp, que no necesitaran de excitación del campo de c.c. y que poseyeran de las características de velocidad constante del motor sincrónico. El rotor consiste en un devanado de jaula de ardilla, embobinado o vaciado distribuido uniformemente en las ranuras.

## 8.17 Motor Sincronico Sin Escobillas

La eliminación del excitador en el eje del motor sincrónico suprimió los problemas relacionados con la conmutación de un generador de c.c. y el chisporroteo de las escobillas conectadas al conmutador. Pero todavía es necesario suministrar la c.c. a través de las escobillas y anillos rozantes, y para eliminar el mantenimiento de estos últimos se creó el motor sincrónico sin escobillas.

En la figura 95 se muestra un diagrama de bloques de un tipo de motor sincrónico sin escobillas. De hecho, el sistema incorpora la rectificación, con las siguientes modificaciones:

- Los rectificadores de silicio están sustituidos por tiristores o por rectificadores controlados de silicio (SCR).
- Los rectificadores controlados de silicio se disparan mediante transistores, los que controlan la salida de c.c. del transistor.
- El transformador se sustituye por un alternador de c.a. que tiene un campo de c.c. estacionario y una armadura polifásica giratoria en la cual se generan voltajes de corriente alterna. La excitación de c.c. del motor sincrónico se controla mediante un variac monofásico que hay en el campo estacionario de c.c. del alternador polifásico, que esta en el mismo eje del rotor que el campo del rotor del motor sincrónico.
- El rotor del motor sincrónico, lleva la armadura del alternador, el control de c.c. estático y el sistema de rectificación, que consta de transistores y tiristores, que se acaba de describir, así como del campo del rotor del motor sincrónico.

Estas cuatro modificaciones, como se muestra en la figura 95, proporcionan una forma de controlar la excitación de c.c. del campo de un motor sincrónico sin necesidad de excitador ni de ningún tipo de anillos rozantes o escobillas.

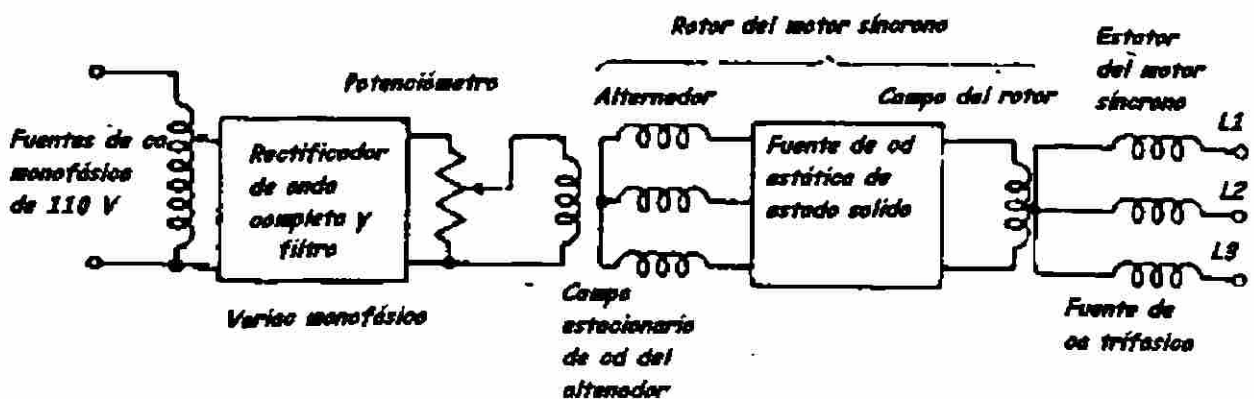


Figura 95 Diagrama de bloques de un motor sincrónico sin escobillas



## 9. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA SIN ESCOBILLAS

### 9.1 Introducción

La expresión de motor de c.c. sin escobillas no puede ser usada para definir un tipo determinado de motor de c.c.

Durante la pasada década han aparecido distintos tipos a los que puede aplicarse esta expresión. En la actualidad los distintos tipos pueden agruparse en tres clases

- Motores de c.c. de conmutación electrónica (Sin escobillas)
- Motores de c.a. alimentados con c.c. a través de un inversor c.c. /c.a.(Sin escobillas)
- Motores de c.c. de rotación limitada (Sin escobillas)

Cada una de estas clases comprende motores de proyecto y concepción distinta, hasta ahora en ninguna de las distintas clases se ha impuesto claramente un proyecto determinado.

### 9.2 Ventajas de los Motores de C.C. Sin Escobillas

Los motores de c.c. sin escobillas, aun cuando son mas caros que los tradicionales a igualdad de potencia poseen las siguientes ventajas.

- Requieren muy poco o ningún mantenimiento
- Tienen una vida más larga
- No presentan chispas eliminándose el peligro de las explosiones y las radiaciones de R.F.
- Como consecuencia de su funcionamiento, no se forman gases ni partículas de colector o escobillas.
- Pueden funcionar sumergidos en líquidos, con gases combustibles e incluso pueden estar herméticamente sellados
- Son generalmente de mayor rendimiento que los servomotores de c.c. con escobillas o que los motores convencionales de c.c.

- Proporcionan una respuesta más rápida (Constante de tiempo menor del servosistema) y una característica bastante constante de salida – corriente de entrada los que los hace particularmente adecuados en aplicaciones de servomotores
- Se les llama motores “Fríos” ya que no producen tanto calor como los convencionales

Las desventajas de estos motores son pocas pero las explicaremos a continuación.

- Tamaño total mayor debido al volumen adicional requerido por el equipo electrónico asociado, ( aun cuando los propios motores sin escobillas son más pequeños que los motores convencionales de c.c. de igual potencia)
- Mayor costo inicial (pero menor costo de mantenimiento)
- Poca capacidad de potencia (hasta 24 HP) por el momento y necesidad de pedidos especiales para aplicaciones determinadas.

### 9.3 Motor de Corriente Continua de Conmutación Electrónica Sin escobillas

Todos los motores de c.c. sin escobillas del tipo indicado tienen un estator bobinado y un rotor de imán permanentes, unido al eje del rotor existe algún tipo de sensor-transductor de la posición del rotor que actúa como entrada del sistema de conmutación a semiconductores que evita la necesidad del colector y de las escobillas.

El motor conmutado electrónicamente lleva incorporado 3 interruptores a semiconductores (transistores) en serie con sus tres devanados en el estator, equivalente a un motor con escobillas que tuviera tres delgas. (Algunos tipos utilizan de 6 a 12 y hasta 100 o más devanados estatoricos e interruptores a transistores del tipo de SCR.)

Unido al eje del motor se encuentra una pantalla que “detecta” la posición del rotor y activa el interruptor-conmutador a transistor de su condición de corte a la de saturación, con lo que se pone en tensión el devanado estatorico productor de par requerido.

El procedimiento indicado en la figura xxx es un procedimiento de detección fotoeléctrico utilizado frecuentemente. Los motores prácticos de conmutación electrónica utilizan otros procedimientos tales como transductores magnéticos, transductores de efecto Hall, sensores electrostáticos, bobinas de inducción electromagnética etc.

La función del transductor o sensor es la de proporcionar la señal para activar un determinado interruptor o transistor desde su condición de corte a la de saturación. El transistor cierra así el circuito de su respectiva bobina estatorica de par.

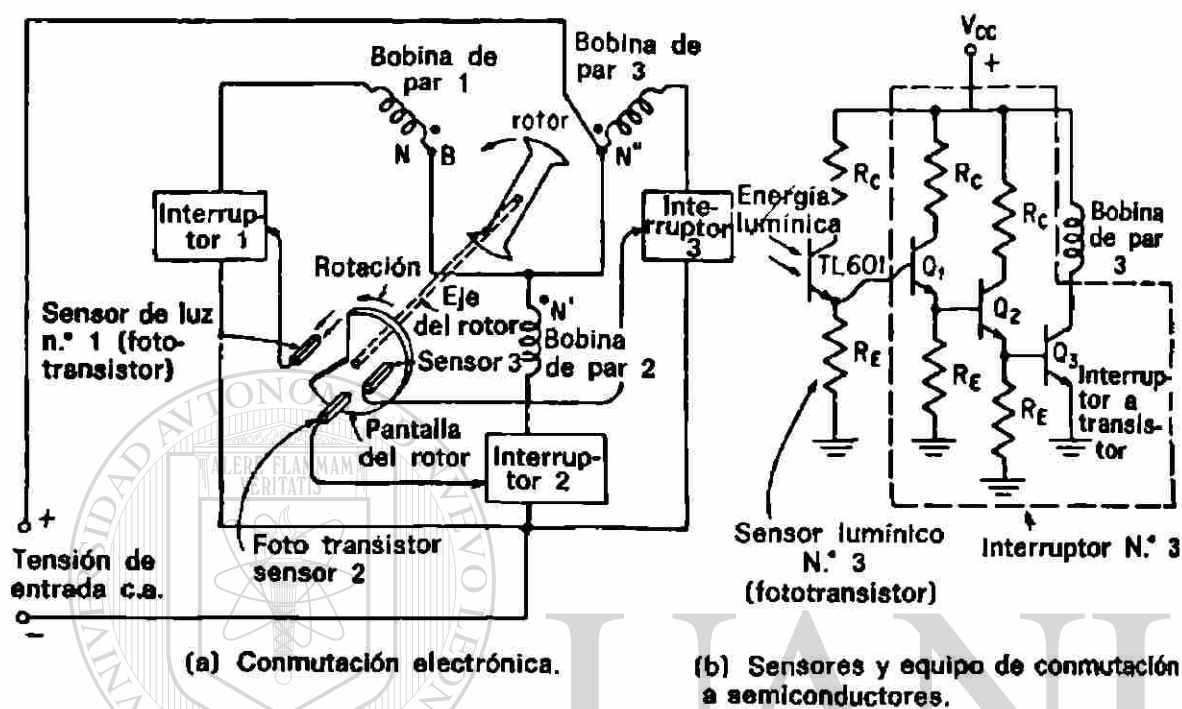


Figura 96 conmutación electrónica en motores de c.c. sin escobillas

El motor de la figura de arriba funciona de la siguiente manera:

- El fototransistor 1 activa el transistor-interruptor de la posición A indicada. Los fototransistores 2 y 3 no están activados porque la fuente de luz (no indicada) está bloqueada por la pantalla.
- El transistor-interruptor 1 activa la bobina 1 que está devanada en sentido tal que produzca un polo de polaridad opuesta a la del imán permanente (PM) del rotor. El rotor se atrae de la posición A a la B.
- En la posición B el fototransistor 1 y la bobina 1 correspondiente se desactivan y se activa el fototransistor 2. Este a su vez activa el transistor 2 y energiza la bobina 2 lo que a su vez atrae al rotor de la posición B a la C.
- El efecto del sensor y del interruptor es el de energizar secuencialmente cada uno de los devanados estatoricos productores de par sucesivamente a fin de conseguir una rotación continua del eje del rotor con un mismo sentido de giro (contrario al de las agujas del reloj en este caso como se indica en la figura de arriba).

c.c. que alimenta el devanado estatorico obteniéndose un par bastante constante en los 90° de cada sentido.

Los motores de giro limitado encuentran aplicación como motores auxiliares de giróscopos utilizados en los dispositivos de estabilización de plataformas espaciales, en los elementos de salida de aparatos registradores, en servomecanismos como amplificadores de par en la regulación fina del control de posición y como servomotores de instrumentos de c.c. tales como indicadores de tacómetros de c.c.

Algunos motores de c.c. sin escobillas de giro limitado tienen el aspecto de motores homopolares ya que tienen discos achatados sin carcasa y no llevan colector.

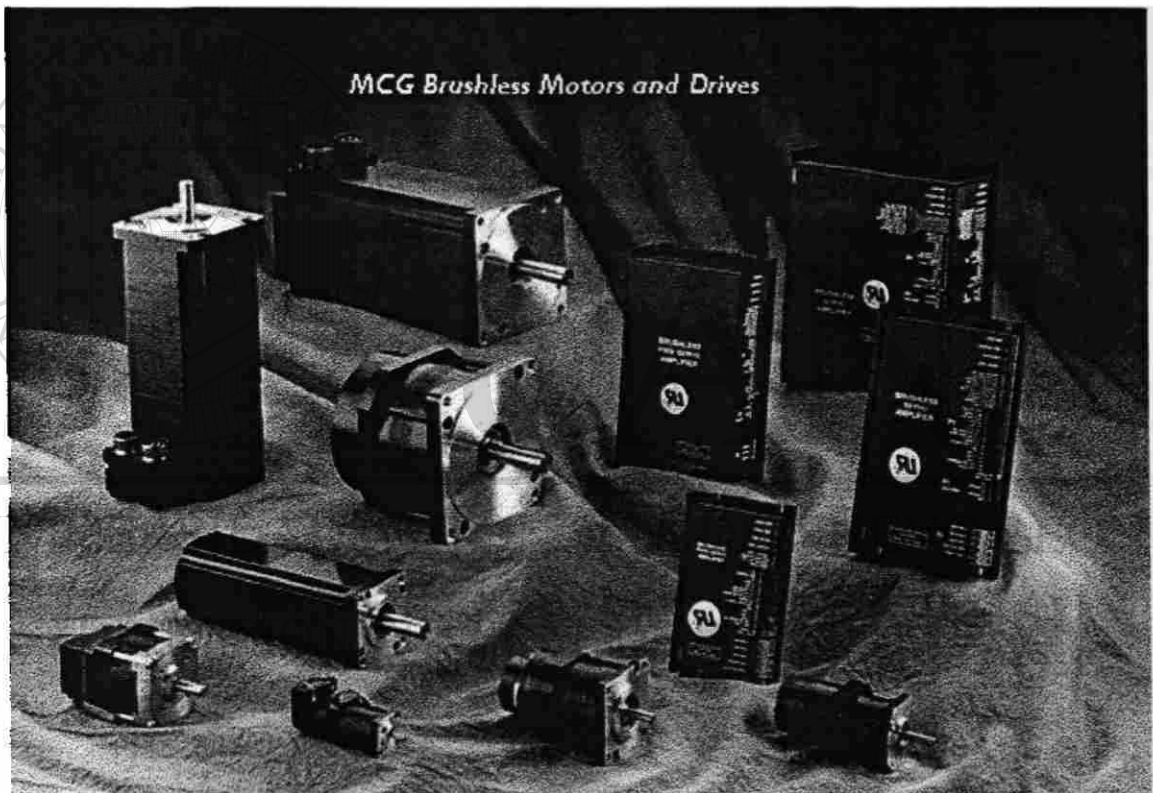
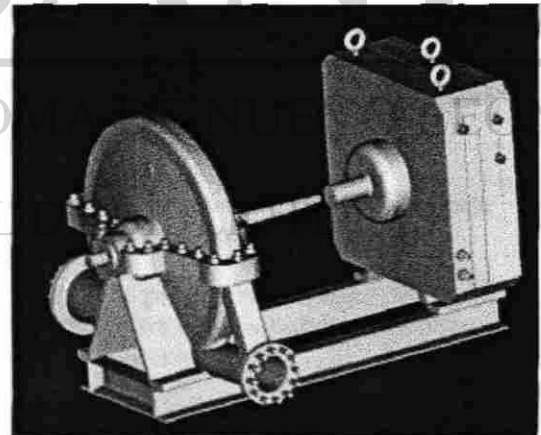


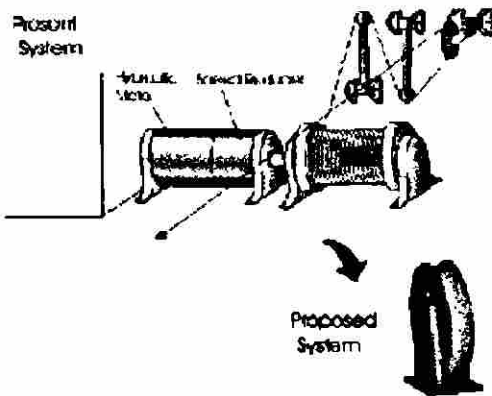
Figura 97 Drives y motores brushless

**Modelo Americano****Fotografía****IBH 100 Instrument Grade Brushless Motor****ABH350 Brushless Automation Series****ABH 750 Automation Grade Brushless Motor****Figura 98** Distintos modelos de brushless d.c. motor**9.6 Aplicaciones**

**Potencia de la bomba del agua de mar**  
**Hp 268 @ 2000 tallas de la RPM**

- Ventajas del motor de 36 pulgadas -
- Bajo costo de mantenimiento
  - Más confiabilidad
  - Más control de la precisión





### *Motor del Tambor de Cable en Sistema de Torno*

Tensión - 8.500 libras de velocidad máxima -  
 aceleración del recorrido del cable de 700 fps - 6,7  
 ventajas máximas fps<sup>2</sup> -

- Menos costo de mantenimiento
- Tamaño más pequeño
- Más liger, peso en pocas piezas móviles
- Menos sensibilidad del sistema .

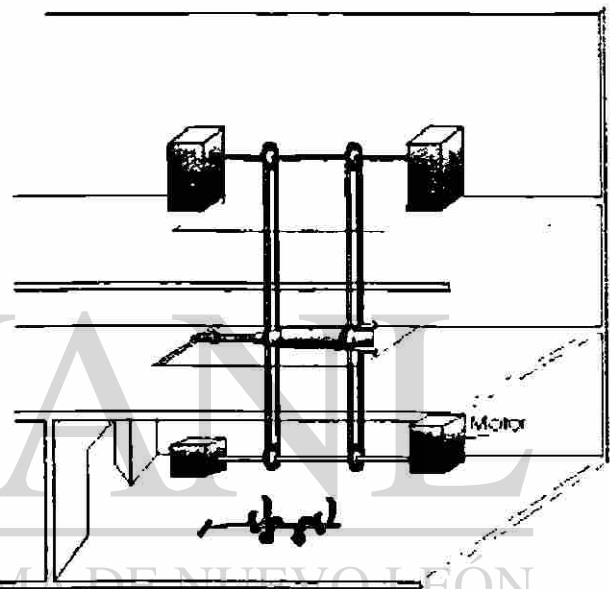
### *Elevador de Avión*

Potencia - 150.000 pies lb-40 de tamaño de 10 seg

Tamaño - cuatro unidades por elevador diámetro de  
 36 pulgadas con mecanismo impulsor del gusano -

#### Ventajas

- Bajo costo de mantenimiento
- Bajo costo de instalación
- Más confiabilidad



### *Dirección / Timón*

Potencia - 40 millones de libras de la pulgada  
 @ 2 1/3 grados / segundo

Medida - 36 pulgadas con ventajas del tornillo de la  
 cumbre (cuatro nuevas unidades substituyen cuatro  
 cilindros hidráulicos) -

#### Ventajas

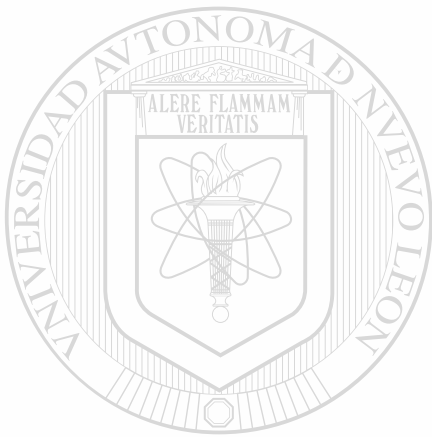
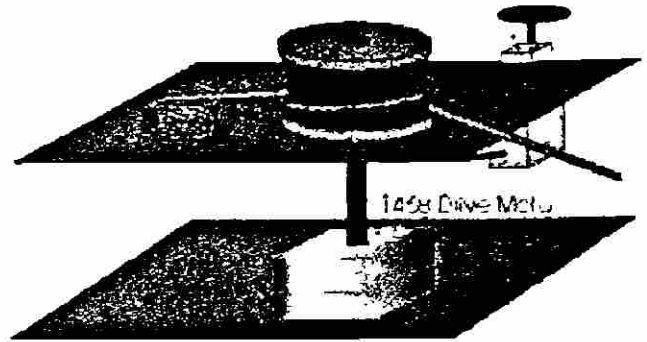
- Bajo el costo de mantenimiento
- Más confiabilidad
- Más control de la precisión

***Cabrestante de Deformación***

Potencia - 220 lb-pies de esfuerzo de torsión 900 RPM

Ventajas de 18,4 pulgadas de diámetro -

- Bajo costo de mantenimiento
- Bajo costo de instalación
- Más control de la precisión



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 10. MOTORES DE PASOS

### 10.1 Introducción

Los Motores de Pasos son motores de mucha importancia, a tal grado que se les puede encontrar formando parte de alguna pieza en casi cualquier equipo o dispositivo electromecánico. He aquí algunos ejemplos de estos dispositivos que emplean los motores a pasos:

- **Impresoras Matriciales:** normalmente contienen por lo menos 2 motores de pasos, a veces con detectores ópticos incrustados a los motores. Estos controlan los movimientos de los cartuchos y del dispositivo que lo sostiene. Como una regla general, impresoras más grandes tendrán más grandes y poderosos motores de pasos en ellos.
- **Floppys del diskette para computadoras:** estos normalmente contienen por lo menos 1 motor de pasos, junto con el motor hará algunas unidades detectoras ópticas para permitirle al motor de pasos distinguir las distintas zonas del diskette, tales como el índice y aquéllas que están protegidas contra escritura.

Estos dos ejemplos de aplicación de los motores de pasos nos dan una idea de su funcionamiento, mismo que se detalla a continuación.

### 10.2 Partes de los Motores de Pasos

La figura 98 muestra las partes fundamentales de cualquier motor a pasos:

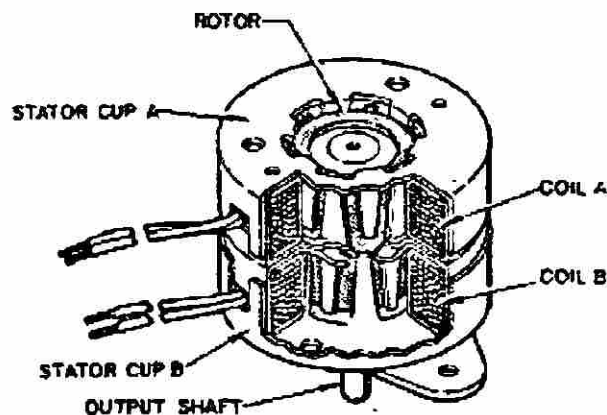


Figura 98 Partes del Motor de Pasos



Las partes del motor mostradas en la figura son:

- Stator cup A: Encapsulado del Estator A
- Stator cup B: Encapsulado del Estator B
- output Shaft: Salida
- coil A: Bobina A
- coil B: Bobina B

### 10.3 Cómo Trabajan Los Motores de Pasos

Los Motores a pasos son usados cuando el movimiento y posición tienen que ser precisamente controlados. Como su nombre implica el motor a pasos se mueve en discretos pasos, cada paso corresponde a un pulso que es suministrada a uno de los embobinados del estator como se muestra a continuación, dependiendo del diseño puede avanzar  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $18^\circ$ , o por una fracción de grado, el desempeño de un motor a pasos depende grandemente del poder suministrado que lo dirige. El poder provisto genera pulsos el cual en su momento es usualmente inicializado por un microprocesador de una computadora.

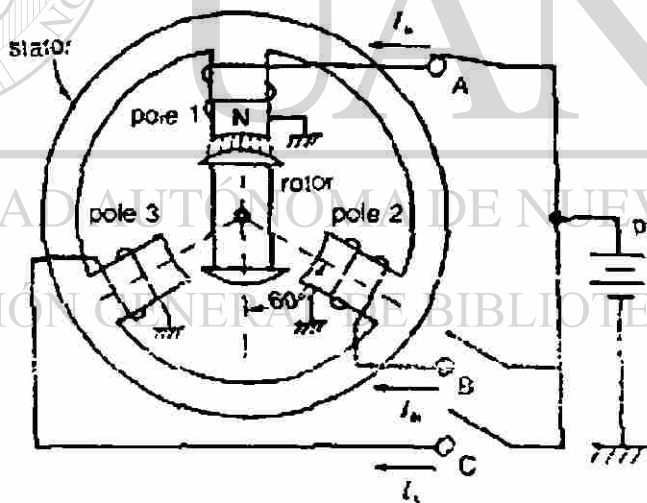


Figura 99 Motor a pasos elemental

Un motor simple de pasos es mostrado en la figura 99, consiste de un estator con 3 polos salientes y un rotor de 2 polos hecho de hierro dulce (moldeable). Las bobinas pueden ser conectadas a una fuente D.C. por medio de 3 switches A, B, C. Cuando los conmutadores están abiertos el rotor puede tomar cualquier posición. De todas maneras si el conmutador A es cerrado el resultante campo magnético creado por el polo 1 atraerá el rotor y entonces se alineará como se muestra.

Si nosotros ahora abrimos el conmutador A y si simultáneamente cerramos el conmutador B el conmutador se alinea con el polo 2, en ese momento rotará unos  $60^\circ$ . La

próxima vez si se abre el conmutador B y simultáneamente cerramos el conmutador C el rotor girara unos  $60^\circ$  adicionales, en ese momento se alinea en la polea 3. Claramente nosotros podemos hacer que el motor avances  $60^\circ$  por pasos cerrando o prendiendo los conmutadores en la secuencia A, B, C, A, B, C. De igual manera nosotros podemos poner en reversa la rotación operando las computadoras en la secuencia de reversa A, C, B, A, C, B. en orden de arreglar la posición final del rotor. El último conmutador que fue cerrado en una secuencia de conmutación debe ser nuevamente cerrado. Esto mantiene el rotor en su última posición y previene de moverlo bajo la influencia de fuerzas externas.

#### 10.4 Diferencias entre el motor de pasos y un motor de c.d. normal (motor de rotor libre)

Al trabajar con motores pequeños de corriente continua o motores de rotación libre. ¿Ha tratado alguna vez de posicionar con precisión algo utilizando un motor de este tipo? Puede ser bastante difícil. Aun cuando solo se le hace arrancar y entonces trata de detenerlo, la armadura no detiene inmediatamente, sino que sigue girando con cierta desaceleración hasta que se detiene por completo. Esto se debe a que estos motores tienen una aceleración y desaceleración muy gradual y su estabilización es lenta.

Si agregamos engranaje al motor ayudará a reducir este problema, pero aún así seguirá deteniéndose tiempo después del deseado y si deseamos controlar posiciones con estos, irán más allá de la posición en la que queremos que se detenga. A este tipo de motores generalmente se le agrega un servomecanismo para mejorar su precisión.

Los Servomecanismos son un pequeño mecanismo de retroalimentación que se agrega a estos motores (usualmente un potenciómetro incrustado en la flecha), y un circuito de control que compara la posición final del motor con la posición deseada y entonces mueve al motor según se necesite. Estos mecanismos pueden hacer bastante complejo y caro las aplicaciones que necesitan controlar posiciones y movimientos por medio de un motor de corriente continua o de rotación libre.

Los Motores de Pasos sin embargo, trabajan de una manera muy diferente y tienen características muy diferentes a estos motores de corriente continua antes mencionados:

- En primer lugar, no pueden rotar libremente por ellos mismos. Como su nombre sugiere ellos rotan o funcionan “a pasos por pasos” es decir van rotando o girando su rotor por instantes pequeños de tiempo, esperando una orden antes de ejecutar cada movimiento.
- Tienen un alto momento de torsión a bajas velocidades, es decir pueden generar un alto par de arranque a velocidades muy bajas. ( Los motores de cc antes mencionados no pueden generar un alto momento de torsión velocidad por ellos mismos, a menos que se les complemente con un mecanismo de engranaje). Esta característica de los motores de pasos les permite mantener firmemente su posición aún cuando no están girando.

Estas características de motores de pasos los hacen muy útiles en aplicaciones donde los motores deben a comenzar a rotar y entonces deben detenerse, mientras la acción de la fuerza de la carga que están moviendo permanece actuando contra él. Estos motores eliminan la necesidad de agregar un mecanismo de frenado mecánico.

Los motores de pasos no solo responden a una señal de reloj de entrada. Tienen varios embobinados que necesitan ser energizados en una secuencia correcta antes de que el rotor comience a trabajar. Si se invierte el orden de la sucesión causará que el rotor del motor gire en la dirección opuesta.

Si la señal de mando no se envía en el orden correcto, el motor no responderá adecuadamente. Simplemente zumbaría y no generaría ningún movimiento o trabajaría pero de una manera muy inadecuada es decir el rotor giraría de una manera brusca y sin ninguna secuencia.

El circuito que es el responsable por determinar el "pasos" y señalar la dirección adecuada de los modelos de energización de los embobinados del motor se le llama transductor (translator). Además del transductor, los motores de pasos necesitan los "drivers", que son los responsables de conducir la alimentación de corriente a los devanados del motor.

Un ejemplo básico de la configuración "transductor + driver" se muestra han la figura 100. Por lógica se separan los voltajes de alimentación al circuito lógico (transductor) y los voltajes de alimentación del motor. Normalmente el motor requerirá un voltaje diferente que el transductor que lo controla. Los valores típicos del voltaje del transductor son de +5 Vcd y de el motor de pasos puede variar desde +5 Vcd hasta aproximadamente +48 Vdc.

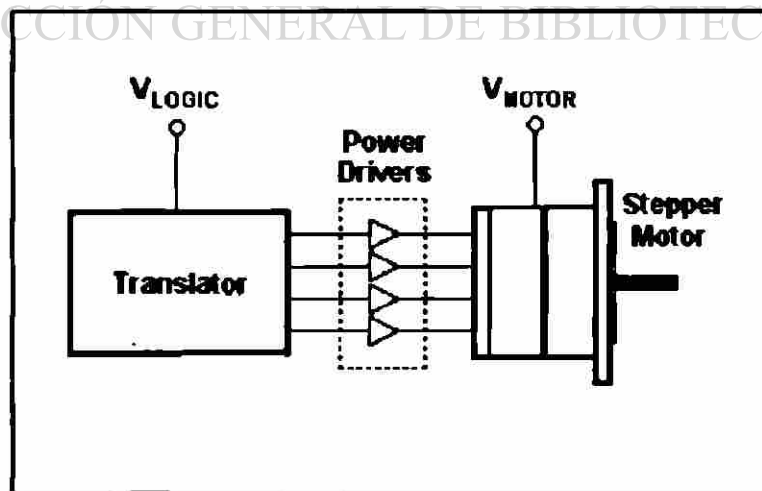


Figura 100 Diagrama básico de una conexión del Transductor y los Drivers de un Motor de Pasos

El driver tiene una configuración de "colector abierto", en qué le toma las salidas de los embobinados de el motor y las mandara a tierra para activar estos embobinados. Esto debido a que la mayoría de los circuitos semiconductores trabajan aterrizados (es decir, al alimentarles a tierra o a un voltaje negativo) que conectados a la fuente de alimentación de voltaje.

## 10.5 Características Más Comunes de Los Motores de Pasos

El comportamiento de los motores de pasos no solo esta determinado por el voltaje. Los siguientes parámetros también definen el comportamiento a la salida de un motor de pasos.

- **Voltaje:**

Los motores de pasos generalmente tienen un rango de voltaje. Este está impreso directamente en la unidad, o se especifica en el manual del fabricante del motor. Exceder el valor del voltaje máximo es algo que se hace para mejorar el momento de torsión del motor, pero esto no sólo lo sobrecalentará, sino que también acortara la vida del motor.

- **Resistencia:**

La resistencia por devanado determinará la trayectoria de alimentación que requiere el motor, también definirá la curva momento de torsión - velocidad en la operación del motor.

- **Grados por pasos:**

Este es a menudo el factor más importante que hay que tomar en consideración al escoger un motor de pasos para una aplicación dada. Este factor especifica el número de grados que el rotor girará por cada pasos completo. Un medio pasos duplicará el número de pasos por revolución y disminuirá el número de grados por pasos a la mitad. Si se tiene un motor de pasos que no tenga especificado el valor de grados por pasos, es posible conocer el número de pasos por revolución del motor. Se pueden calcular los grados por pasos al dividir 360 por el número de pasos en 1 revolución completa del motor. Los valores más comunes de Grados por pasos en los motores de pasos incluyen: 0.72, 1.8, 3.6, 7.5, 15, y 90 grados por pasos. A los grados por pasos se les llama a menudo la resolución del motor. Si se tiene un motor tiene impreso sólo el número de pasos por revolución, se divide 360 por este número y se obtendrá el valor grados por pasos del motor.

## 10.6 Tipos de Motores de Pasos

Los motores de pasos se dividen en tres categorías básicas.

- Motores de pasos con Reluctancia variable.
- Motores de pasos con Magneto permanente.
- Motor de pasos Híbrido

El tipo de motor determinará el tipo de los drivers y el tipo de transductor que utilizará.

Por otro lado, los motores de pasos con magneto permanente se dividen a su vez en tres subcategorías:

1. Motores de pasos con magneto permanente Unipolares
2. Motores de pasos con magneto permanente Bipolares
3. Motores de pasos con magneto permanente con variedad de Multifases

## 10.7 Motores de Pasos con Reluctancia Variable

A veces llamado motores Híbridos, los motores de pasos de reluctancia variable son los más simples de controlar comparándolos con los demás motores de pasos. La secuencia del driver que utiliza este motor es simplemente dar energía a cada uno de los devanados en orden, uno después del otro (ver la tabla de energización mostrada en la figura 101). Este tipo de motores de pasos a menudo tendrá únicamente un cable el cual es el común para todos los devanados. Este tipo de motor se siente como un motor de D.C. cuando la flecha se hace girar a mano, ya que gira libremente y no se pueden sentir los pasos al tocarlo. Este motor de reluctancia variable no se magnetiza permanentemente ni bipolar ni unipolarmente.

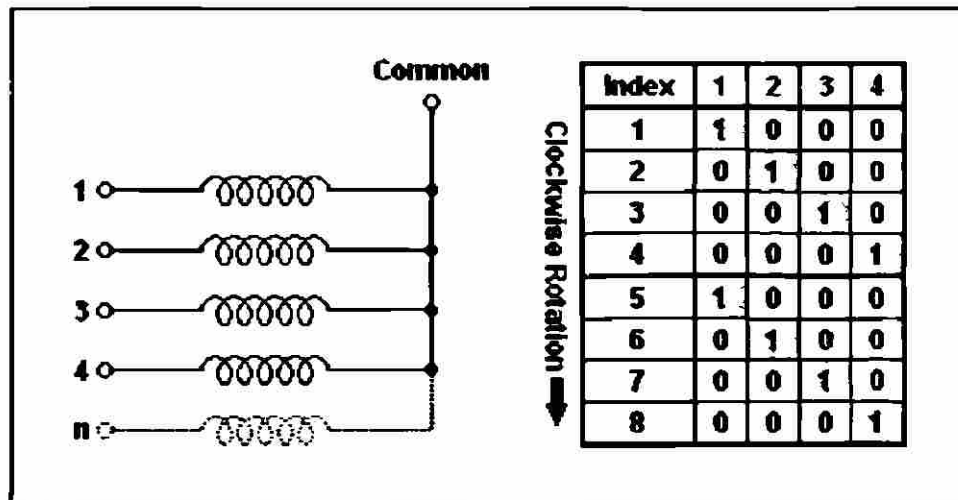


Figura 101

Diagrama básico de los devanados de un motor de reluctancia variable (izquierda) y tabla de secuencia de alimentación del driver (derecha)

En los motores de pasos con reluctancia variable el estator frecuentemente tiene 4 polos principales y las fases de los polos son de 1 a "n" hasta producir un número de polos dados. El rotor también es dentado cada diente corresponde a un polo saliente. El número de dientes (polos) del rotor y estator determina el ángulo de movimiento por pasos. Los valores más comunes de grado por pasos en los motores de reluctancia variable son de  $18^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $7.5^\circ$ ,  $5^\circ$  o  $1.8^\circ$ .

### 10.8 Motores de Pasos con Magneto Permanente:

Son similares a los anteriores con la diferencia que el rotor tiene dos polos Norte y Sur. Nos evocaremos a la figura antes mostrada que representa a un motor de magneto permanente.

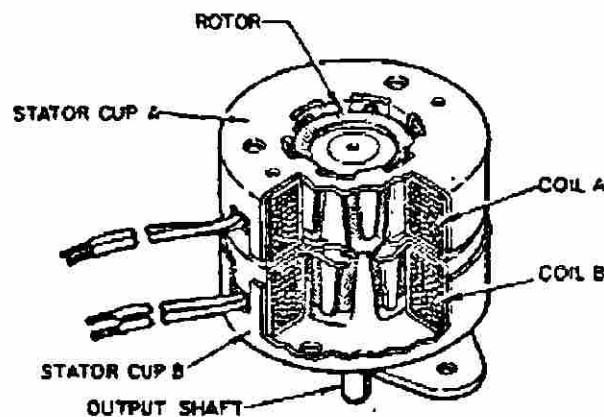


Figura 102 Motor de pasos con magneto permanente

Teniendo los polos magnéticos permanentes el rotor procura alinearse con los 2 últimos polos que fueron excitados por el conductor. En efecto el motor desarrolla un llamado torque de detención que mantiene el rotor colocado a pesar que no ocurran

corrientes en las bobinas del estator. Las bobinas A1, A2, son conectadas en serie como están las bobinas B1, B2. Comenzando de la posición mostrada si las bobinas B son excitadas el rotor se moverá a través de un ángulo de 30°. De todas maneras la dirección de rotación depende de la dirección de corriente.

### 10.8.1 Motores de pasos con magneto permanente Unipolares:

Este tipo de motores son relativamente fáciles controlar. Un circuito contador simple de 1 a 'n' puede generar la secuencia apropiada de pasos para el funcionamiento del motor, y como driver se usa un simple transistor por devanado. Los motores Unipolares son caracterizados por su devanados de derivación central. Un esquema de la instalación eléctrica común se realiza tomando todos los devanados de derivación central y alimentarlos con + MV (voltaje de motor). El circuito del driver aterrizaría cada devanado para energizarlo.

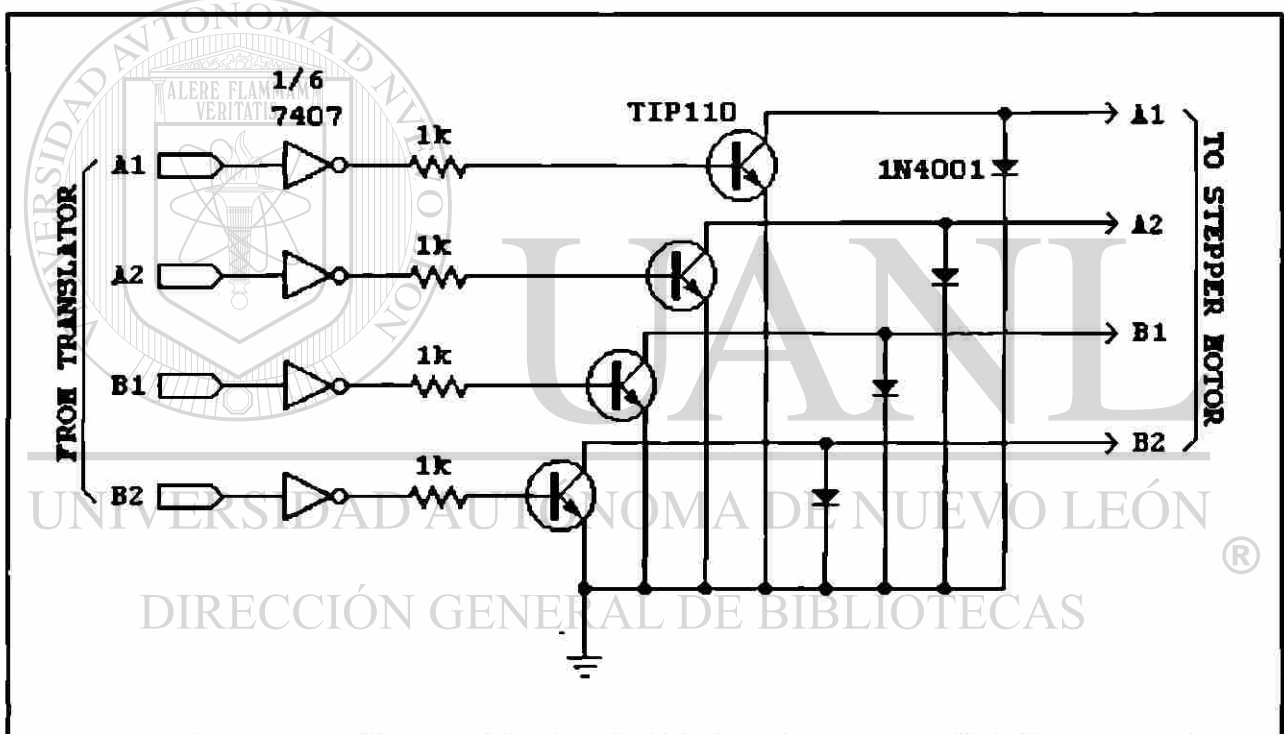


Figura 103

El circuito del driver de un motor de pasos Unipolar típico.  
Nótese los 4 diodos utilizados para la protección del circuito.

Los motores de pasos unipolares son reconocidos por sus devanados de derivación central. El número de fases es dos veces el número de devanados, dado a que cada devanado se divide en dos. Así el diagrama de la figura 104, que tiene dos devanados de derivación central, representa la conexión de un motor de pasos unipolar con 4 fases.

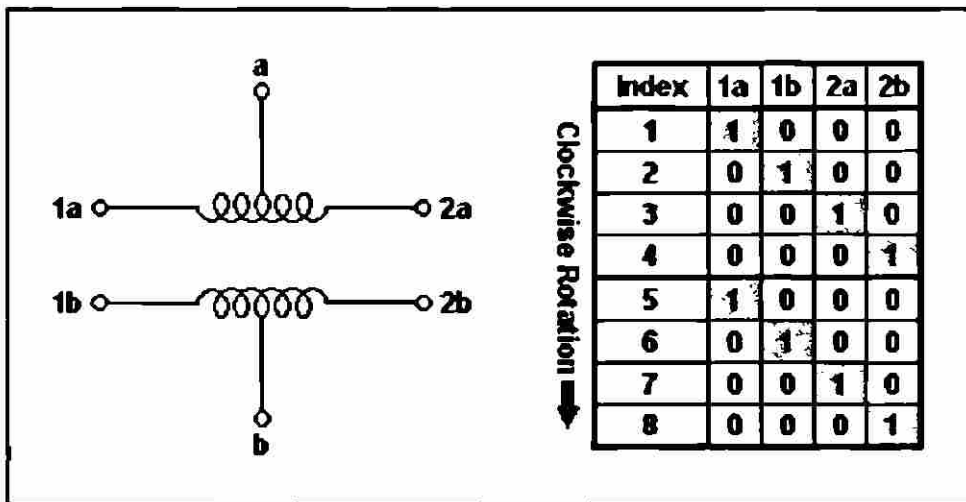


Figura 104

Diagrama básico de los devanados de un motor de pasos unipolar (izquierda) y tabla de secuencia de alimentación del driver (derecha)

Además de la secuencia estándar de energización del driver, es posible tener secuencias para que el motor trabaje con alto momento de torsión o para que trabaje con la mitad de un pasos. Para lograr una secuencia de alto momento de torsión, los dos devanados son activados al mismo tiempo para cada pasos del motor, esta combinación de los dos devanados rinde alrededor de 1.5 veces más momento de torsión que en la secuencia normal, pero consume el doble de corriente.

Para alcanzar una secuencia para la mitad de un pasos se combinan las dos secuencias. Primero, se activan uno de los bobinados, después dos, después uno, etc. Este efectivamente duplica el número de pasos que el motor avanzará por cada revolución de la flecha del motor, y disminuye el número de grados por pasos en la mitad.

Index	1a	1b	2a	2b
1	1	0	0	1
2	1	1	0	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	1
5	1	0	0	1
6	1	1	0	0
7	0	1	1	0
8	0	0	1	1

Alternate Full Step Sequence  
(Proveedores motor torque)

Index	1a	1b	2a	2b
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1
9	1	0	0	0
10	1	1	0	0
11	0	1	0	0
12	0	1	1	0
13	0	0	1	0
14	0	0	1	1
15	0	0	0	1
16	1	0	0	1

Half Step Sequence

Figura 105 Secuencia del driver para dos fases por pasos (izquierda) Secuencia del driver para mitad de pasos (derecha)



## 10.8.2 Motores de pasos con magneto permanente Bipolares

A diferencia de los motores de pasos con magneto permanente unipolares, los motores de pasos Bipolares requieren una circuitería del driver más compleja. Los motores de pasos con magneto permanente bipolares se caracterizan por excelentes dimensiones de su radio de torsión, y proporciona más momento de torsión para ese tamaño que los motores unipolares. Se diseñan motores bipolares con devanados separados que necesitan ser energizados en cualquier dirección. (La polaridad necesita invertirse durante su funcionamiento) para el apropiado funcionamiento del motor. Este tipo de motores presenta un driver sofisticado. Los motores de pasos con magneto permanente bipolares utilizan la configuración binaria para alimentar los drivers al igual que los motores unipolares; pero en el caso de los motores bipolares las señales “0” y “1” corresponden a la polaridad del voltaje aplicado a los devanados y no simplemente señales de “encendido” y “apagado” (“on-off”). La figura 106 muestra un arreglo básico de un devanado bipolar de 4 fases y su secuencia de energización.

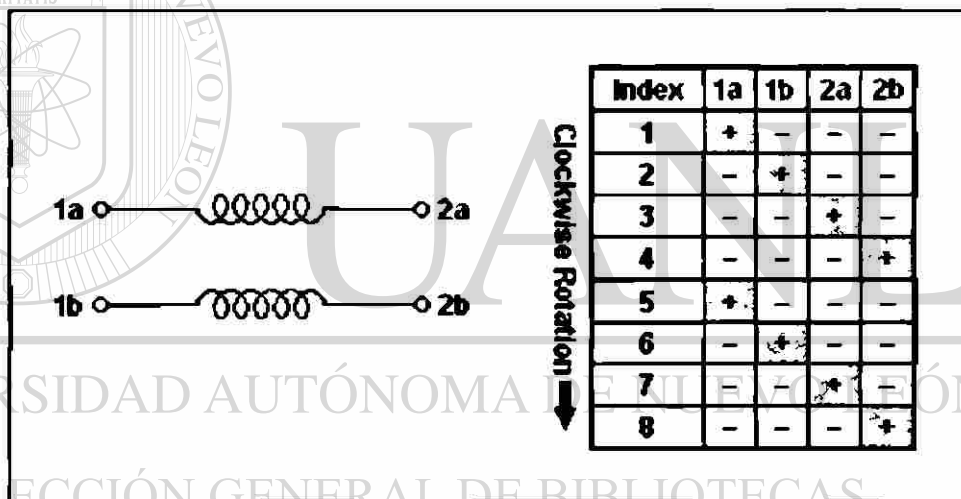


Figura 106 Diagrama básico de los devanados de un motor de pasos bipolar (izquierda) y tabla de secuencia de alimentación del driver (derecha)

Un circuito conocido como Puente-H (figura 107) se usa comúnmente. Cada devanado del motor de pasos bipolar necesita su propio driver de Puente-H. Un motor de pasos típico tiene 4 alimentaciones conectadas a dos devanados en el motor. Hay muchos circuitos integrados para ser usados como drivers en el motor de pasos. Convenientemente, estos circuitos integrados para puente-H normalmente tienen un par de puentes-H dentro de ellos, así estos circuitos tienen una cantidad mínima de partes para funcionar, siendo más pequeños los circuitos. Un problema con el puente-H (circuito básico) es que con cierta combinación de valores de entrada tasa (es decir que ambos sean '1's) el resultado es que el voltaje que alimenta al motor es disminuido por el efecto de los transistores. Un circuito EX OR pequeño se agregó circuito de la lógica en figura 107 para evitar que una combinación de '1's entre por los transistores.

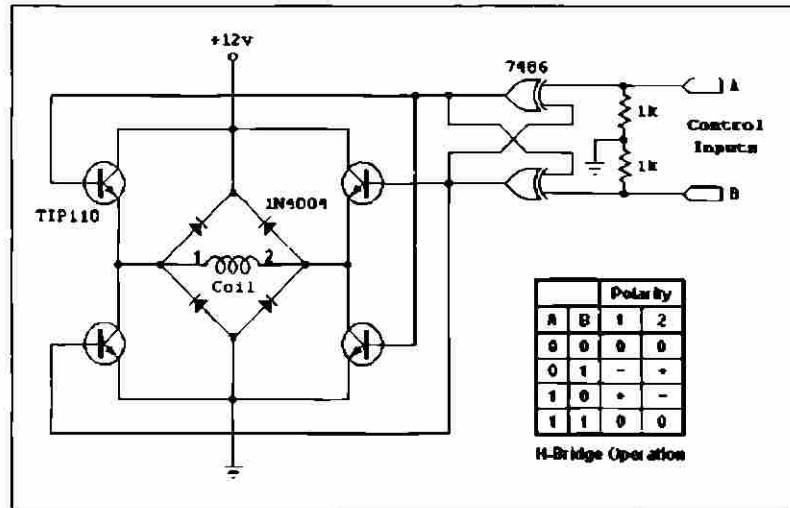


Figura 107

Un circuito típico de Puente-H. Los 4 diodos son para protección del circuito

## 10.9 Motores De Pasos Híbridos

Tiene 2 armaduras idénticas montadas en el mismo pozo, las armaduras son indexadas de tal manera que los polos salientes están interlapados. El arreglo de los motores híbrido hace que el rotor se vea como un motor de reluctancia variable. Pero tienen un imán permanente PM presionado entre la armadura. Esto produce un campo magnético axial con el resultante de que todas las poleas en la primer armadura son "N" poleas mientras aquellas en la segunda armadura son "S" polos. Las bobinas del estator son conectadas en serie y de la misma manera el rotor recordara en la posición mostrada. La dirección de rotación de nuevo dependerá de la dirección de la corriente en la bobina

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 10.10 Circuitos Transductores

En esta sección mostraremos ejemplos de circuitos básicos transductores para un motor de pasos sencillo. Al implementar un circuito antes de soldarlo es necesario probarlo para verificar su adecuado funcionamiento con el motor trabajando.

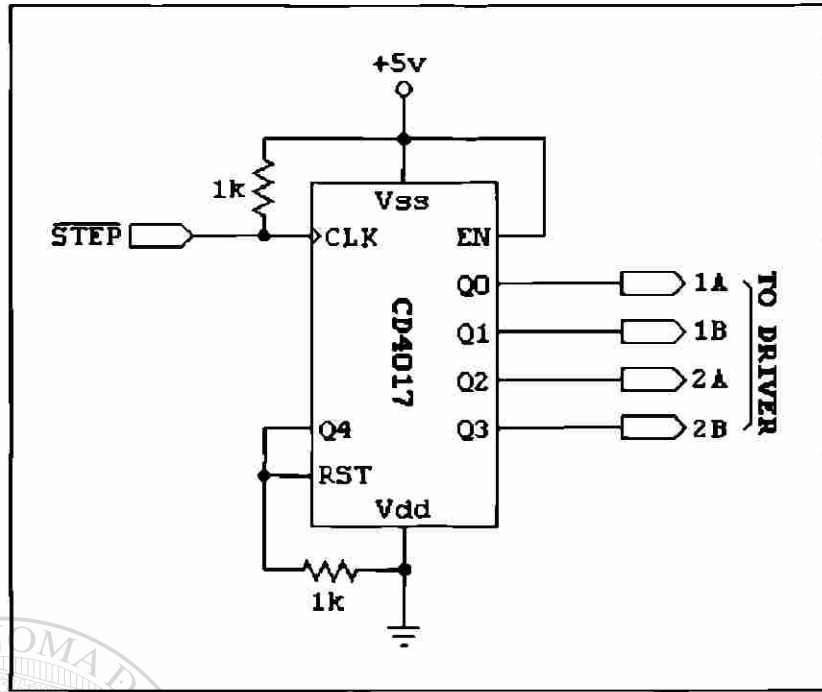
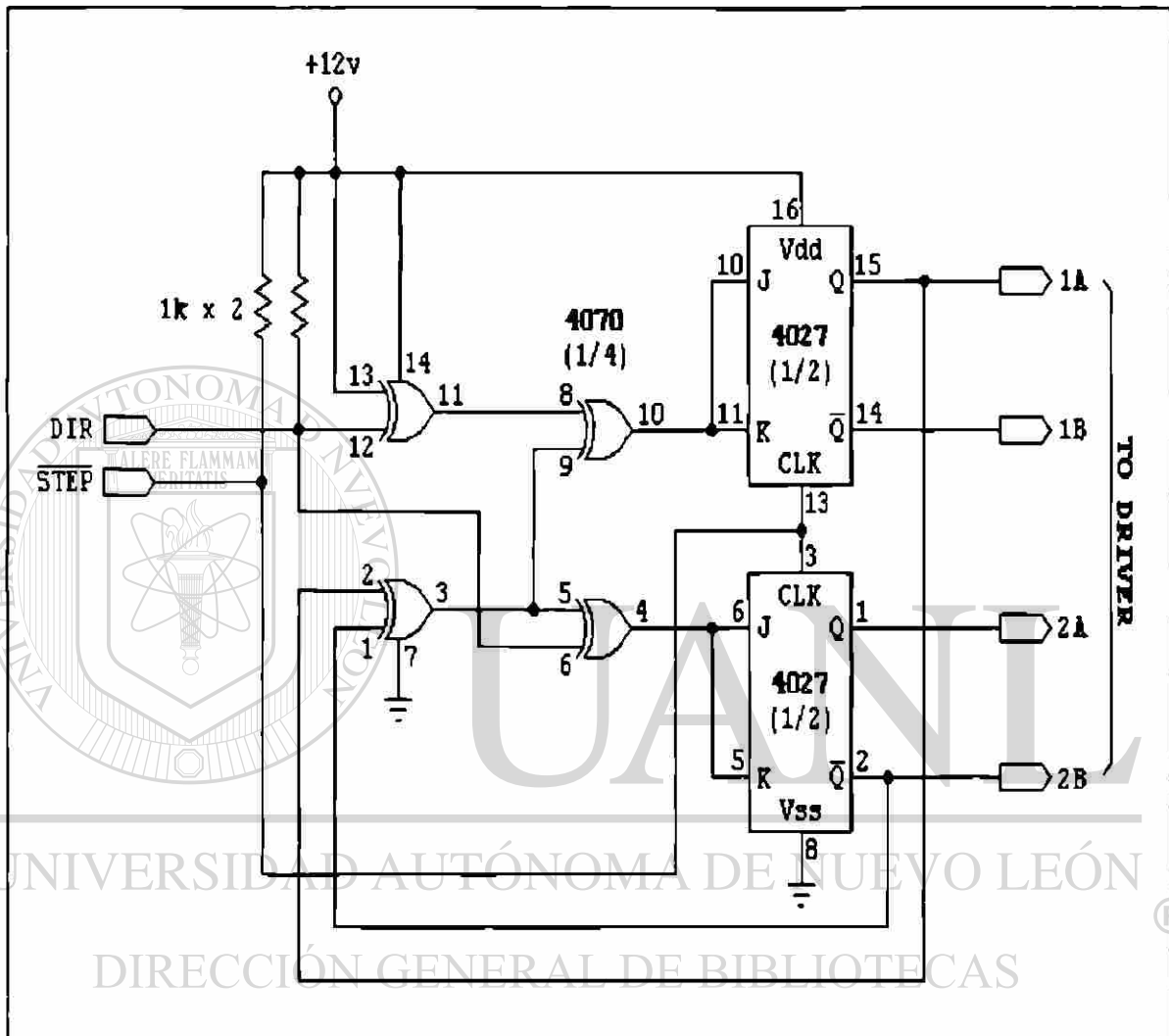


Figura 108 Circuito integrado CD4017

La figura 108 ilustra la solución más simple a generar un uno por fase en la sucesión del driver. Para un motor de pasos unipolar como el mostrado en la figura 104 o para un motor de pasos bipolar de la figura 106, pueden ser conectados a las cuatro salidas de este circuito para proveer un circuito completo de driver - transductor. La limitante de este circuito es que no puede invertir la dirección del giro del motor. Este circuito estaría más útil en aplicaciones donde el motor no necesita cambiar direcciones.

La figura 109 muestra un transductor por funcionamiento de dos fases. Este circuito es. Éste circuito tiene un problema, cuando se invierte la dirección y continúa girando el motor adelantará 1 pasos más en la dirección previa que iba antes de responder. ®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



**Figura 109**

Ejemplo de un transductor para ambas direcciones  
(Con adelantamiento de un grado)

Por último la figura 110 muestra un circuito que trabaja en ambas direcciones sin proporcionar ningún problema.

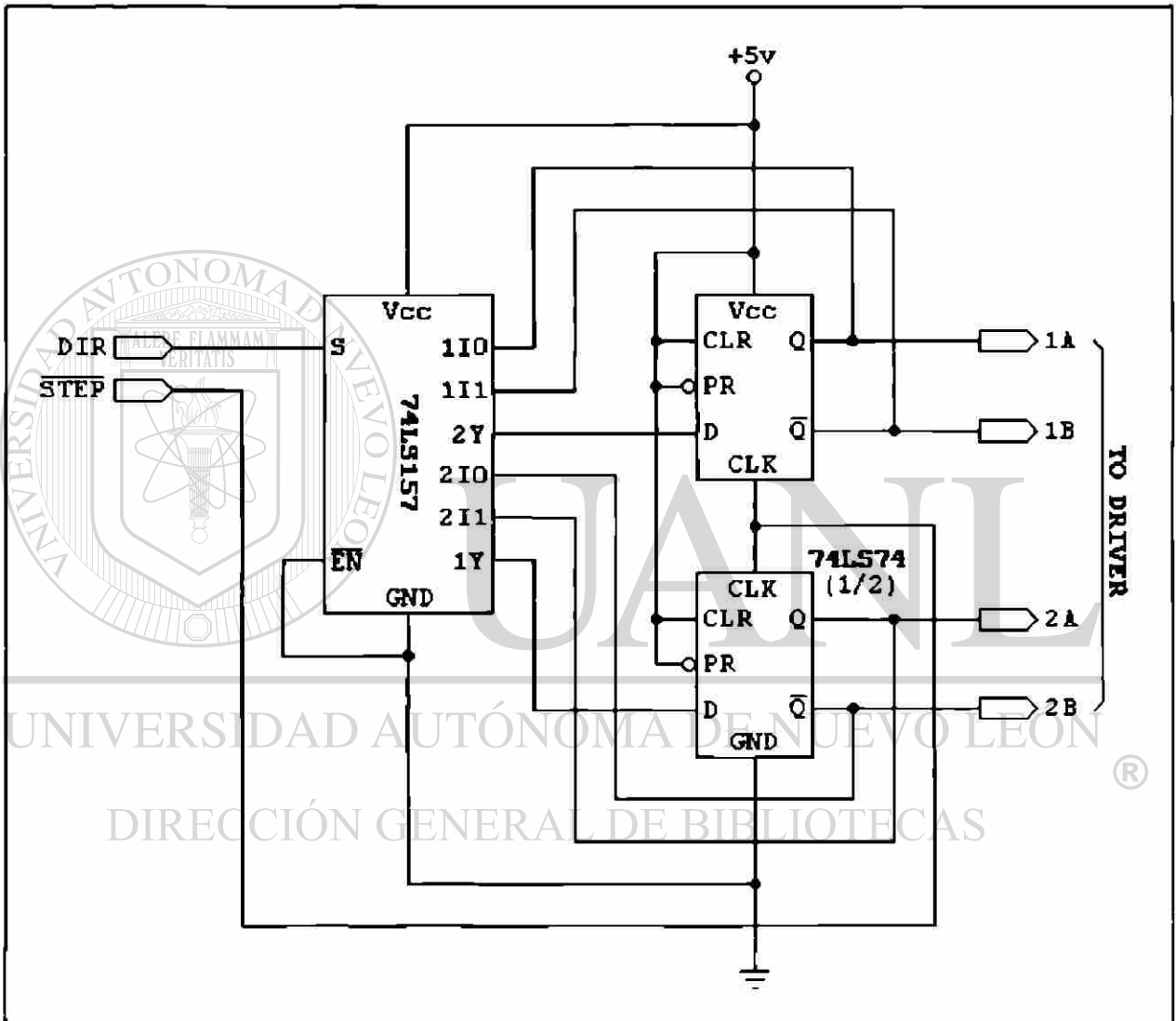


Figura 110 Circuito electrónico bidireccional para motores de paso

# 11. CONTROL ELECTRONICO DE MOTORES

## 11.1 Introducción

La industria, en el sentido más amplio de la palabra, y los transportes, cada vez tienen mas necesidad de sistemas de velocidad variable de forma continua, dotados de flexibilidad y precisión. Evidentemente, todavía se utilizan las soluciones mecánicas e hidráulicas, pero hoy en día, las soluciones eléctricas son, con mucho las mas apreciadas. Su éxito es fruto de las características incomparables que le confiere la electrónica, tanto en el aspecto de conversión de energía como en el de retroalimentación del sistema.

En la actualidad (y todavía por bastante tiempo), los motores de corriente continua, que por naturaleza son maquinas de velocidad variable, son los mas utilizadas, los motores de corriente alterna se introducen en sectores prohibidos a los motores de corriente continua por razones de medio ambiente o limitaciones mecánicas (velocidad) o incluso eléctricas (voltaje), siendo por tanto complementarios.

Ciertamente, los principios del control electrónico de los motores de corriente continua se conocen desde hace mucho tiempo, pero la industrialización se debió a los progresos extraordinarios conseguidos en la ultima década en el campo de los semiconductores de potencia, los componentes de pequeña señal, de los circuitos integrados, y más recientemente de los microprocesadores lo que ahora hacen posible y hasta cierto punto sencillo poder controlar la velocidad de los motores de c.a. mediante la variación de la frecuencia del voltaje aplicado al motor.

## 11.2 La Regulación de Velocidad

Para efectuar un determinado trabajo con unas prestaciones dadas, el sistema ha de estar retroalimentado. El primer papel de un sistema de regulación es obligar a la magnitud o magnitudes retroalimentadas (salidas del sistema) a conservar valores tan próximos como sea posible a los que se consideren como ideales. Estos valores ideales o teóricos, son a su vez funciones de las magnitudes de entrada del sistema: "referencia" y "perturbación". Si procedemos de forma que como entradas suplementarias utilizaran funciones de las magnitudes de salida, habremos creado un <<lazo cerrado>> o un control con retroalimentación. Inversamente, si no hay retorno de la salida hacia la entrada se habrá hecho un sistema de lazo abierto, como el control del acelerador de un coche.

Hay tres razones para utilizar el control de retroalimentación. En primer lugar, es el medio más cómodo para realizar las relaciones deseadas entre la entrada y la salida. También permite compensar de forma interna las imprecisiones y las derivas de las características de los componentes del sistema. Por ultimo, y es el punto que normalmente se considera más importante, al menos desde el punto de vista del explotador, minimiza las perturbaciones que, procedentes del exterior del sistema, afecta ala salida.

### 11.3 Funciones de un Regulador

A un regulador no solo se le pide hacer coincidir el valor de la variable primaria, sino también realizar un cierto número de funciones necesarias para el buen comportamiento de la máquina:

- Limitación de las magnitudes críticas: como la corriente o la tensión de inducido. Esta es una función de protección.  
Si se alcanza el valor límite de la variable secundaria, el sistema de regulación abandona el control de la variable primaria y se dedica a la vigilancia de la variable secundaria, manteniéndola tanto como necesite en su valor límite.
- Control preciso de las variables de forma que se eviten evoluciones excesivamente rápidas de las mismas.  
Por ejemplo, el control del gradiente de corriente en un inducido es necesario para obtener una conmutación, y como consecuencia para mantener el colector en buen estado.
- Paso sin golpe de un modo de control a otro.  
La conmutación de la regulación de velocidad con limitación de corriente a la Regulación de corriente debe hacerse sin brusquedades.
- Ajuste y optimización fáciles de un lazo de control, independientemente de los otros.

### 11.4 Principios de Regulación

Los tres conceptos de sistemas retroalimentados son:

- 11.4.1 la regulación en lazos convergentes
- 11.4.2 la regulación lineal con lazos múltiples o en cascada
- 11.4.3 la regulación con lazos en paralelo, o de conmutación paralela.

Estos tres métodos permiten controlar la variable principal y limitar las variables secundarias, a continuación se hará un breve análisis de cada uno de ellos.

#### 11.4.1 Regulación en lazos convergentes

Un sistema convergente está formado por un solo regulador, por lo menos en una versión simplificada suficiente para la explicación del principio. La señal de reacción proveniente de la variable realimentada principal (velocidad) está presente constantemente en la entrada de el regulador.

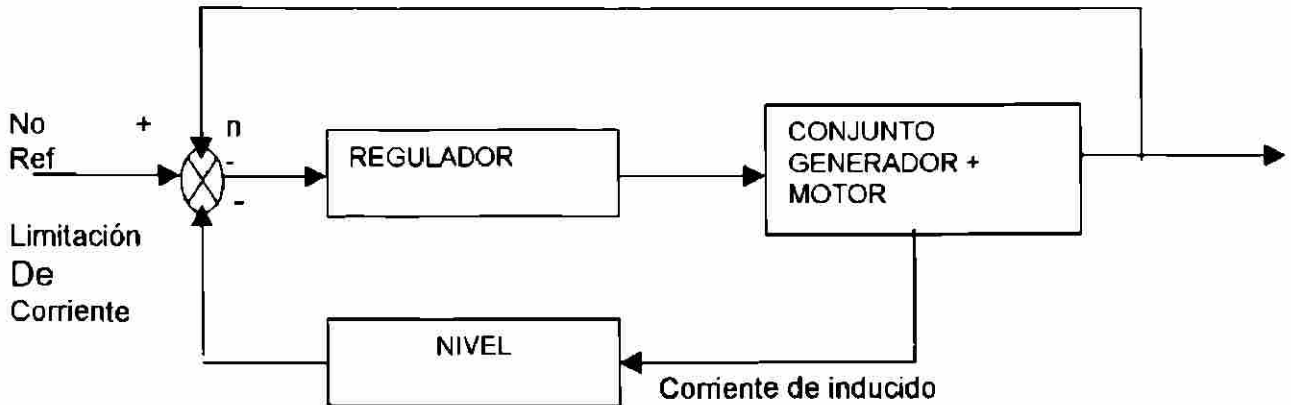


Figura 111 Esquema de regulación convergente.

La señal proveniente de la variable secundaria (en este caso la corriente), se compara aun umbral y de alguna manera se bloquea mientras no se alcanza el valor de limitación. Por encima del umbral, el exceso alcanza la entrada del regulador y contrarresta la señal de retorno de velocidad, tendiendo así a limitar la corriente de inducido.

Una ventaja evidente de este concepto es que pide relativamente poco material, siendo una opción poco costosa; sin embargo, presenta un cierto número de inconvenientes no despreciables. Como solo hay un regulador para dos variables, se ha de llegar a un compromiso entre sus ajustes, lo que provoca en el momento de la puesta en marcha, mayor trabajo para ajustar las ganancias que con los dos sistemas que hemos citado. Por último y quizá sobre todo, la limitación de corriente, no solo depende del umbral impuesto en la señal de reacción (o zona muerta) y de la ganancia del lazo de corriente, sino también de la referencia de velocidad: cuando la referencia de velocidad aumenta, la limitación de la corriente también se eleva. Esto se puede remediar más o menos limitando la variación de velocidad.

#### 11.4.2 Regulación lineal con bucles múltiples (sistema en cascada)

Un sistema de regulación en cascada esta formada por un regulador individual para cada una de las variaciones controladas. La variable retroalimentada principal (velocidad) se regula por el lazo exterior. La salida del regulador de velocidad sirve de entrada al regulador del lazo interior, en este caso un lazo de corriente. Limitando la salida del regulador externo de velocidad, se limita por tanto la referencia del regulador interno de corriente y se obtiene de forma muy simple la característica de limitación deseada



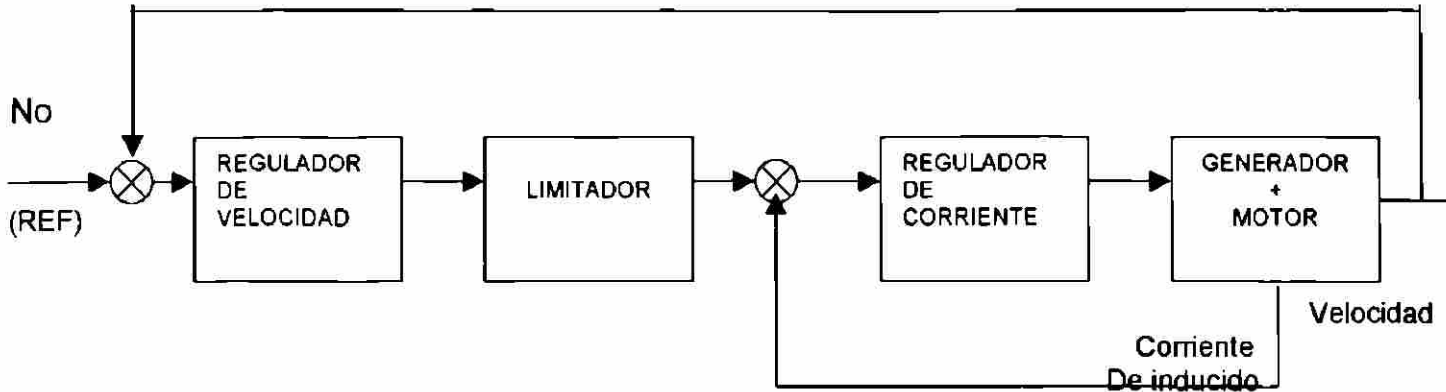


Figura 112 Esquema de regulación en cascada

En general, los sistemas de regulación en cascada se diseñan de forma que solo tengan una o dos constantes de tiempo principales en un lazo, que se puedan compensar directamente en el interior de los reguladores correspondientes, como consecuencia de ello, resulta que el cálculo de estos sistemas es relativamente sencillo.

#### 11.4.3 Regulación paralela

Al igual que en el sistema en cascada, el sistema de comunicación paralela utiliza un regulador separado para cada variable que se ha de controlar. Por el contrario, las salidas de estos reguladores se conectan, gracias a un dispositivo de conmutación, a una salida común que es el borne de entrada del sistema de potencia que alimenta al motor. En este dispositivo, solo un regulador está en servicio en todo momento: esta es la diferencia fundamental con el montaje en cascada, en que todos los reguladores actúan permanentemente.

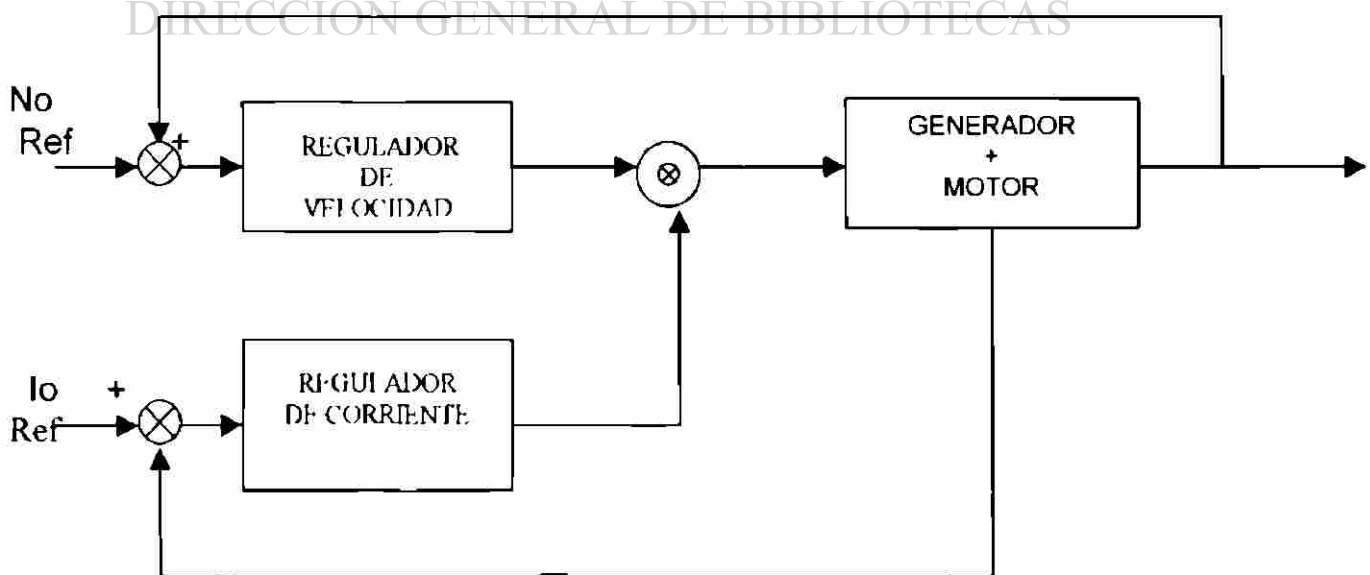


Figura 113 Esquema de la regulación paralela

En resumen, las características de la regulación paralela se describen de la siguiente manera:

- A cada variable bajo control le corresponde un regulador separado; por lo tanto cada lazo se puede regular al óptimo.
- Se pueden regular las características dinámicas y estáticas de una regulación paralela independientemente unas de otras.
- Se puede hacer la transferencia sin golpe de un modo de conmutación a otro.
- El estudio, el cálculo y la puesta en servicio de los reguladores son sencillos, por el hecho de que cada lazo sea independiente con relación a los otros
- Con una relación en paralelo, se puede obtener una respuesta más rápida que con un sistema en cascada, con la condición de que el sistema no contenga más de dos constantes de tiempo mayores.

La conclusión a la que llegamos es que la comparación de los tres conceptos de regulación demuestra que los dos últimos son netamente superiores al montaje con lazos excepto en un punto. Esta es la cantidad de componentes necesarios, que en el caso de una regulación convergente es más pequeña; pero en la práctica, la economía es pequeña y casi siempre se puede considerar despreciable.

Limitando la comparación a los sistemas cascada y paralelo, vemos que cada uno de estos dos conceptos tiene ciertas ventajas específicas, de forma que la elección entre ellos dependerá del sistema al que vaya destinado.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



## 11.5 Inversor de Frecuencia para Corriente Alterna

En el área de la industria se requiere del control de velocidad de un motor, esto se puede lograr por medio del cambio de poleas en el motor (variando el diámetro), también aplicando resistencias al devanado (esto es abriendo el devanado y poniendo una resistencia fija con un valor calculado para obtener la velocidad necesitada), otra forma es cambiando el número de polos del motor (es decir cambiando el motor completo, ya que el número de polos de un motor está determinado en su diseño), y otra manera es variando la frecuencia de alimentación del motor, esto se logra con dispositivos llamados Inversores de Frecuencia (o Variador de Velocidad). Este último está sustituyendo a los demás métodos ya que es mucho menos complicado y no requiere de mantenimiento debido a que es un dispositivo electrónico que solo necesita trabajar en condiciones normales de operación establecidas por los fabricantes.

## 11.6 Definición de “Drive” de Corriente Alterna

El drive de frecuencia ajustable es un dispositivo electrónico de estado sólido para controlar la velocidad de los motores de C.A.

Los nombres que recibe son: Inversor de frecuencia, Drive de C.A., Variador de velocidad, Control de velocidad, Invertidor, Convertidor de frecuencia, o simplemente inversor.

En la actualidad, existen dos tipos de inversores:

- Tipo Convencional
- Tipo Vector

## 11.7 El inversor tipo Convencional.

Es para propósitos generales, está diseñado para aplicaciones donde se requiera torque constante, pero la desventaja que tiene es que a bajas velocidades (en un rango de 1 a 10 Hz), empieza a perder torque, ya que por su diseño no es posible obtener más torque a esas velocidades, por lo tanto, en aplicaciones donde se requiera mantener el torque a bajas velocidades se utiliza el inversor tipo Vector, que proporciona un 100% de torque en la flecha del motor a velocidad cero “0”. (Esto es enfocado en la marca Safronics, el modelo de este inversor es VG5).

## 11.8 Inversores tipo Vector

Debido a que los inversores tienen un diseño PWM su salida es escalar. Esto significa que la salida de voltaje está escalada en un método de control de Volts/Hz. Esta relación de Volts/Hz usualmente tiene un número de funciones programables disponibles. Estas funciones o patrones permiten al inversor alcanzar las características de desempeño del motor o motores para alcanzar los requerimientos de alguna aplicación. El microprocesador y el número de bits que procesara determina la regulación de frecuencia o la precisión de control. Por ejemplo, un control de 8 bits tiene incrementos de 0.5 Hz, y un control de 16 bits equivale a una resolución de 0.1 Hz. Debido a que los inversores convencionales son comúnmente de lazo abierto y usualmente no tienen alguna forma de retroalimentación, los inversores tienen un desempeño definido, pero los motores requieren de un deslizamiento sobre una demanda de torque. Un verdadero control de torque y control de regeneración son difíciles de obtener con los inversores convencionales.

El control Vector puede ser definido como:

Control de flujo, control de posición de campo orientado, torque contra control de deslizamiento, la manufactura de los diferentes inversores tipo vector usan varios métodos de software y hardware para la definición de términos de referencia, pero el resultado final usualmente provee de una respuesta rápida, una excelente regulación de velocidad y un control de torque muy preciso. Los métodos del control vector son matemáticamente muy

complejos y por lo tanto no se mencionaran en este escrito. Mencionaremos sin embargo algunas de las habilidades del control y de los elementos que logran el desempeño del control de flujo

Con el fin de obtener una buena regulación de velocidad, control de torque incremental, el motor usado con un inversor tipo vector, debe tener su propia personalidad o características de operación, definidas por el microprocesador del inversor. Entre mayor sea la información obtenida podemos un mejor desempeño del inversor

Una de las características más importantes del inversor tipo vector, es el autotuning para el motor. Autotuning es el método por el cual el inversor vector estudia al motor. En algunas aplicaciones, nosotros necesitamos de información en otras condiciones dinámicas de operación para que el inversor pueda responder mejor a estos cambios. La lógica del inversor requerirá resistencia del estator (en caliente y en frío), resistencia del rotor (frío y en caliente), deslizamiento, factor de potencia, voltaje y corriente del estator, frecuencia del estator, saturación del entrehierro, inductancia del estator, inductancia del rotor, e inductancia de magnetización.

Esta información junto con la información procesada del inversor vector y otros atributos hacen del desempeño vector una realidad.

Características principales del inversor tipo vector:

- ✓ Regulación del 0.01% de la velocidad de referencia para un 100% de cambio en la Carga.
  - ✓ Control incremental de torque, mejor del 100% del valor de torque del motor, a velocidad cero.
- 
- ✓ Respuesta tipo servo a cambios instantáneos en la carga o en la referencia.
  - ✓ Siempre hay que recordar que, solamente un motor puede ser usado en un inversor tipo vector debido a las características requeridas.

Las características únicas de control del inversor tipo vector han hecho realmente posible, el remplazo de aplicaciones de control de motores de c.d. con control de motores de c.a.

## 11.9 Componentes que Forman a Un Inversor

El inversor puede dividirse en 4 principales componentes

- 1- Convertidor o Rectificador
- 2- Circuito Intermedio.
- 3- Circuito Inversor
- 4- La Electrónica del Circuito de Control

### 1.- Convertidor o Rectificador.

Convierte la alimentación trifásica de c.a. a voltaje de c.d pulsante, el convertidor puede ser controlado (SCR'S) y no controlado (Diodos).

### 2.- Circuito intermedio:

hay varios tipos, el más usado es el que estabiliza el voltaje de c.d. pulsante y envía este voltaje regulado al circuito inversor.

### 3.- Circuito inversor:

el cuál convierte un voltaje constante de c.d. a voltaje de c.a variable y control de la frecuencia al motor.

Los principales semiconductores usados son:

- SCR'S (Voltaje medio, 2300, 4160 7200 volts)
- Transistores Bipolares
- Transistores IGBT'S
- MOS-FET
- GTO'S

El switcheo del inversor es en dos patrones, uno llamado PAM "Pulse Amplitude Modulation" y el otro llamado PWM "Pulse Width Modulation". El más empleado es el control PWM.



Figura 114 Comparación entre los métodos de modulación PAM y PWM

### 4 - La electrónica del circuito de control:

el cual envía señales al rectificador, circuito intermedio y al circuito inversor, donde se también se encuentra el microprocesador, memorias, puertos de comunicación al drive.

A continuación se muestra un diagrama esquemático de los componentes internos más principales de un inversor. El diseño de los inversores varía entre marcas fabricantes, pero en principio son construidos en el mismo modo.

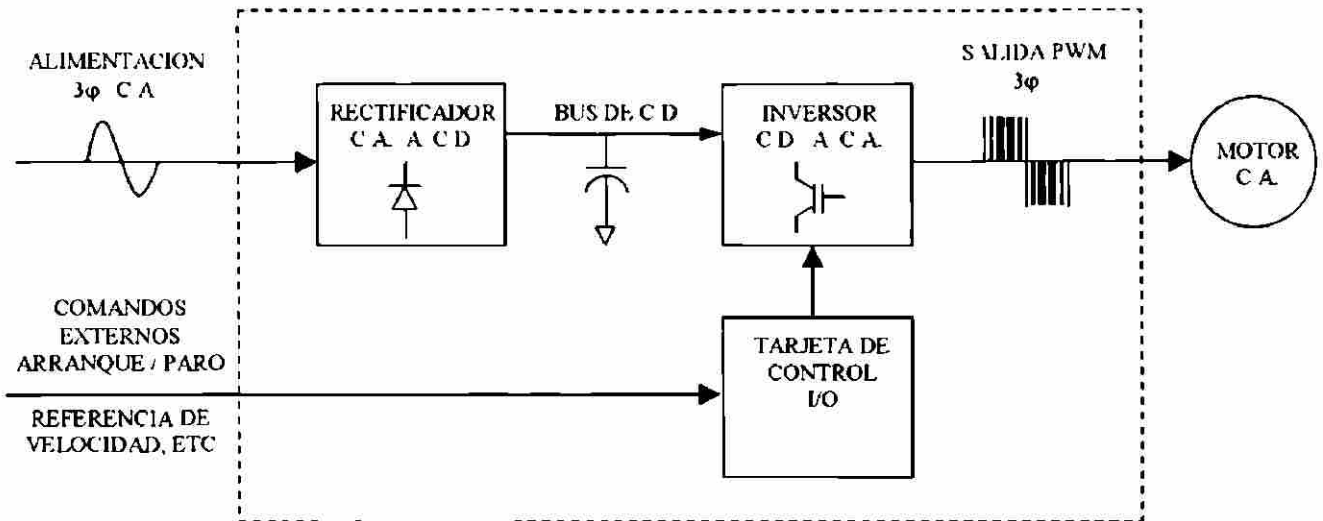


Figura 115 Diagrama de un inversor de frecuencia

En la actualidad se cuenta con la tecnología de los transistores IGBT'S, que combinan las características de los transistores MOSFET y las de los bipolares lo que permite que actúe con grandes tensiones y corrientes a una elevada velocidad. Otra característica de estos nuevos dispositivos es que en condiciones estadísticas no utiliza corriente de excitación en la compuerta.

Se fabrica en una nueva combinación de técnicas MOS y bipolares. Según su característica de entrada es comparable con la de un transistor de efecto de campo de autobloqueo (MOSFET) y por lo tanto se puede controlar casi sin potencia. Del lado de salida, el IGBT es similar al transistor bipolar de potencia (PTR), y consecuentemente puede conmutar con tensiones relativamente altas (actualmente de 600 a 1400 Volts) así como altas corrientes (actualmente 100 Amps por chip), con mayor frecuencia de pulsos.

En módulos con aislación interna eléctrica a la placa metálica de base, los chips de silicio de los IGBT'S así como los diodos inversor rápidos asociados se conectan entre sí de acuerdo con diagramas circulares fijos. Para esto se utiliza una técnica optimizada de unión y armado. Tales módulos partes constituyentes de un inversor.

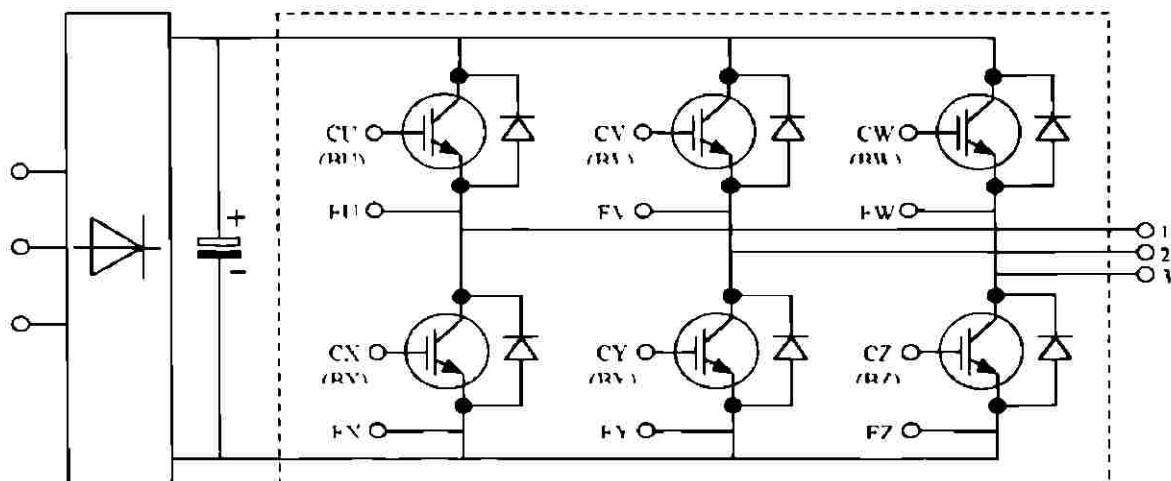


Figura 116 Modulo de transistores de 6 pulsos para un motor trifásico

Con el diseño de los brazos del puente, las posibilidades de protección contra sobrecorriente y sobretensión están influenciadas simultáneamente. Las medidas de protección pueden ser eficaces de manera activa a través de la electrónica de control o de manera pasiva mediante los componentes de supresión.

En condiciones estáticas de operación el IGBT no necesita corriente de excitación de compuerta porque es controlada por tensión. Pero en el encendido y apagado se generan pulsos de corriente de excitación de compuerta de corta duración como consecuencia de la capacidad de entrada que deben tenerse en cuenta.

El apagado se logra en principio, terminando el control positivo y poniendo a cero la tensión compuerta-emisor VGE. Pero normalmente es ventajoso controlar al IGBT negativamente con la tensión emisor-compuerta VEG. Así es posible comenzar tales perturbaciones que actúan sobre la compuerta debido a capacidades parásitas que resultan principalmente de procesos de conmutación.

El resistor de compuerta R<sub>G</sub>, limita la magnitud de los pulsos de corriente de compuerta que ocurren en el encendido y en el apagado. Variando V<sub>LF</sub> y consecuentemente VGE así como R<sub>G</sub>, es posible influenciar la tensión colector-emisor en la región de saturación, los tiempos de conmutación así como la disipación de conmutación.

## 11.10 Funcionamiento

El inversor de frecuencia: convierte la frecuencia y el voltaje de alimentación de valores fijos a valores variables. Esto se logra a través del circuito inversor (anteriormente explicado).

Es necesario variar la frecuencia debido a que la velocidad del motor de c.a. es proporcional a su frecuencia de alimentación, dado por la siguiente fórmula

$$N = \frac{f \times 120}{\text{No. } P}$$

donde:

f = Frecuencia en Hz.

N = Velocidad del motor en R.P.M.

No. P = Numero de polos del motor

Como se ve la velocidad es directamente proporcional a la frecuencia, y con el número de polos se determina la velocidad base del motor, es decir, un motor de 4 polos, su velocidad base a 60 Hz. es 1800 R.P.M.

Nota:  $N$  es la velocidad sincrónica, por lo que se está despreciando el deslizamiento, del 2% al 4% aproximadamente en los motores actuales, tipo jaula de ardilla.

El voltaje también se debe variar en la misma proporción en que se varíe la frecuencia, es decir, si el motor es conectado a 460 V a 60 Hz., al alimentar a 30 Hz., el voltaje debe ser aproximadamente la mitad de 460 V, con lo cual es 230 V.

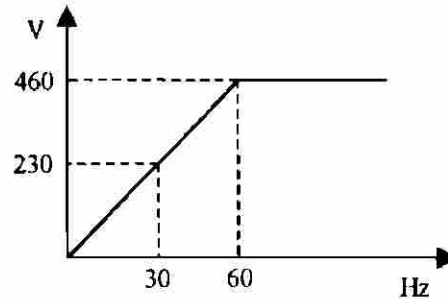
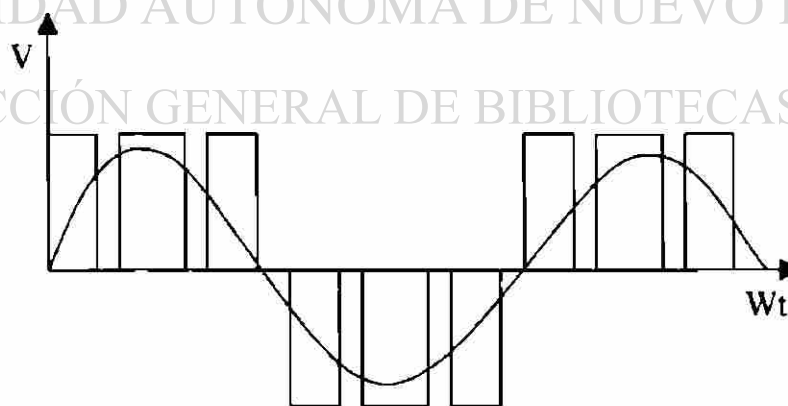


Figura 117 relación de Volts/Hertz en un inversor

A esta relación es llamada Volts/Hz., y es la que produce la magnetización en el motor de C.A., y al mantener esta relación constante, se puede disponer del 100% del torque cuando la carga así lo requiera.

Como ya vimos, en los componentes del inversor, que a la salida del mismo tenemos una señal PWM (Modulación por Ancho de Pulsos), esta señal está codificada senoidalmente, esto es con el fin de simular una señal de corriente alterna senoidal, a esta señal también se le conoce como "Señal de Corriente Alterna No Pura" o "Voltaje de Corriente Alterna No Puro". A continuación se muestra una gráfica esquemática de esta señal.



Señal PWM

Figura 118 Forma de onda de la señal PWM

La forma de salida es senoidal, y dependiendo del dispositivo de switcheo en el circuito inversor empleado va a ser la limpieza en la señal de corriente y, por ejemplo empleando transistores bipolares o SCR's el contenido de armónicas a media y bajas frecuencias fundamentales son muy altas, generando con ello calentamiento en el motor.

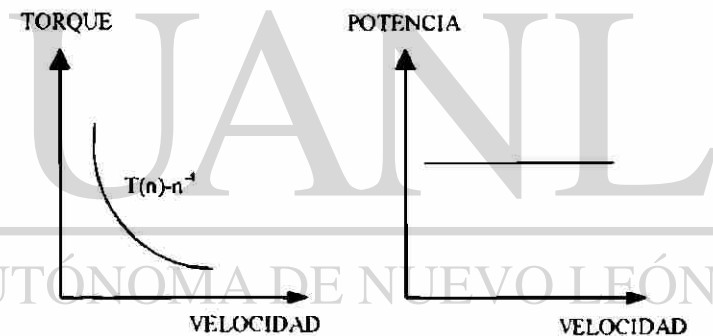
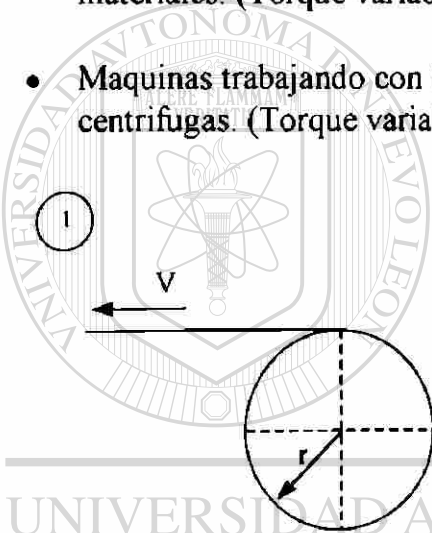


perdida de torque, y ruido auditivo en el motor. Y ahora con la tecnología de los IGBT la forma de onda se dice que es virtualmente senoidal.

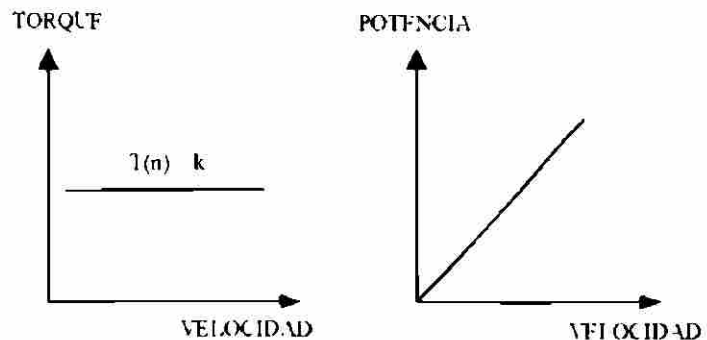
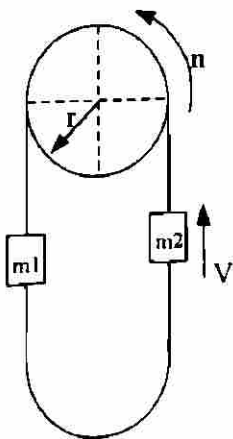
### 11.11 Aplicaciones

Dependiendo de la aplicación (tipo de carga), será el comportamiento del motor; siendo los principales tipos de carga:

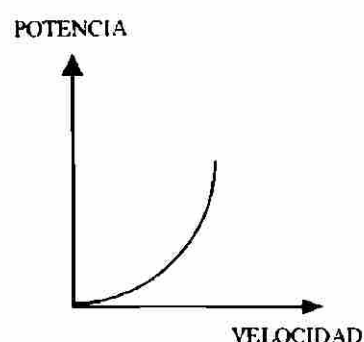
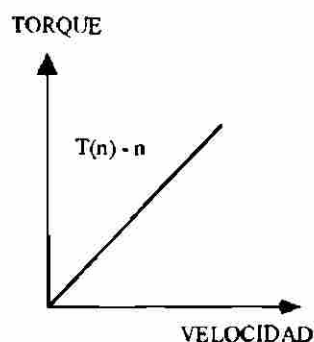
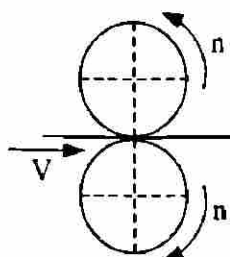
- Embobinadores, Maquinas cortadoras y Maquinas herramientas (Torque variable)
- Transportadores de diferentes tipos de grúas y bombas de desplazamiento positivo, Extrusoras. (Torque constante)
- Maquinas pulidoras, Rodillos de calandra y otras maquinas de procesamiento de materiales. (Torque variable lineal)
- Maquinas trabajando con fuerzas centrifugas, como par ejemplo ventiladores y bombas centrifugas. (Torque variable función  $x^2$ )



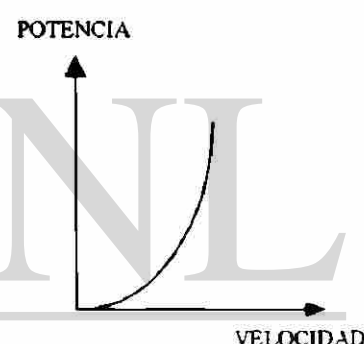
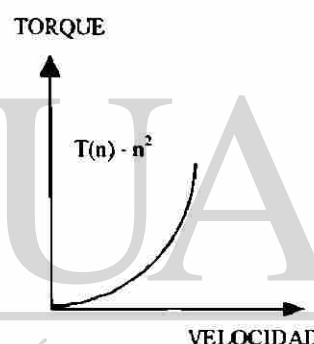
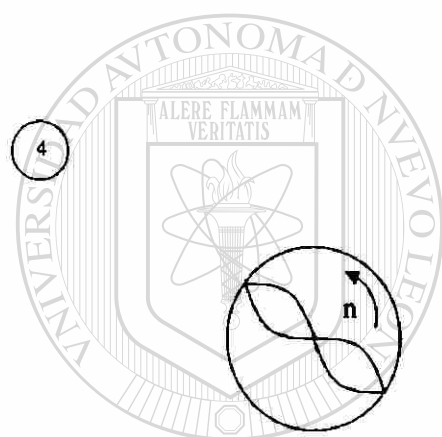
2



3



4



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Figura 119 Aplicaciones de velocidad variable

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Para poder seleccionar la capacidad del motor y del inversor, se necesitan tomar en cuenta los siguientes datos:

- Aplicación (Tipo de carga)
  - Rango de velocidad a operar
  - Torque de arranque
  - Temperatura Ambiente: para el motor y para el drive
  - Altura de la locación, ejemplo Monterrey 580 mts. s. n. m.
  - Eficiencia del sistema de reducción, poleas, reductor, cadena o combinación de estos.
- Para el drive:
- Tiempo de aceleración
  - Tiempo de desaceleración
  - Tiempo y ciclo de frenado

Nota: El motor de c a al emplearse con un inversor de frecuencia debe tener aislamiento clase F o H.

Si el motor se va a emplear en un rango mayor de 4:1, y la capacidad seleccionada es 20 HP o mayor, se recomienda usar un ventilador o soplador externo para enfriamiento del motor a bajas velocidades.

Los inversores pueden operar con cualquiera de los siguientes motores:

- ◆ Motores de Inducción: Jaula de ardilla
- ◆ Motores Sincrónicos: de Imán permanente  
de Reluctancia  
de Hysterisis

Con los inversores podemos sustituir algunos variadores mecánicos o eléctricos como por ejemplo:

- ✓ Variadores Mecánicos
  - PIV'S
  - Cambio de poleas
- ✓ Variadores Eléctricos
  - Motores de rotor devanado
  - Motores de dos velocidades
  - Motores de polos conmutantes

Las principales ventajas de tener un inversor de frecuencia son:

- No partes móviles, control estático
- Mayor eficiencia que un sistema de C.D o sistema mecánico
- Rango infinito de ajuste de velocidad
- Rápido cambio de velocidad

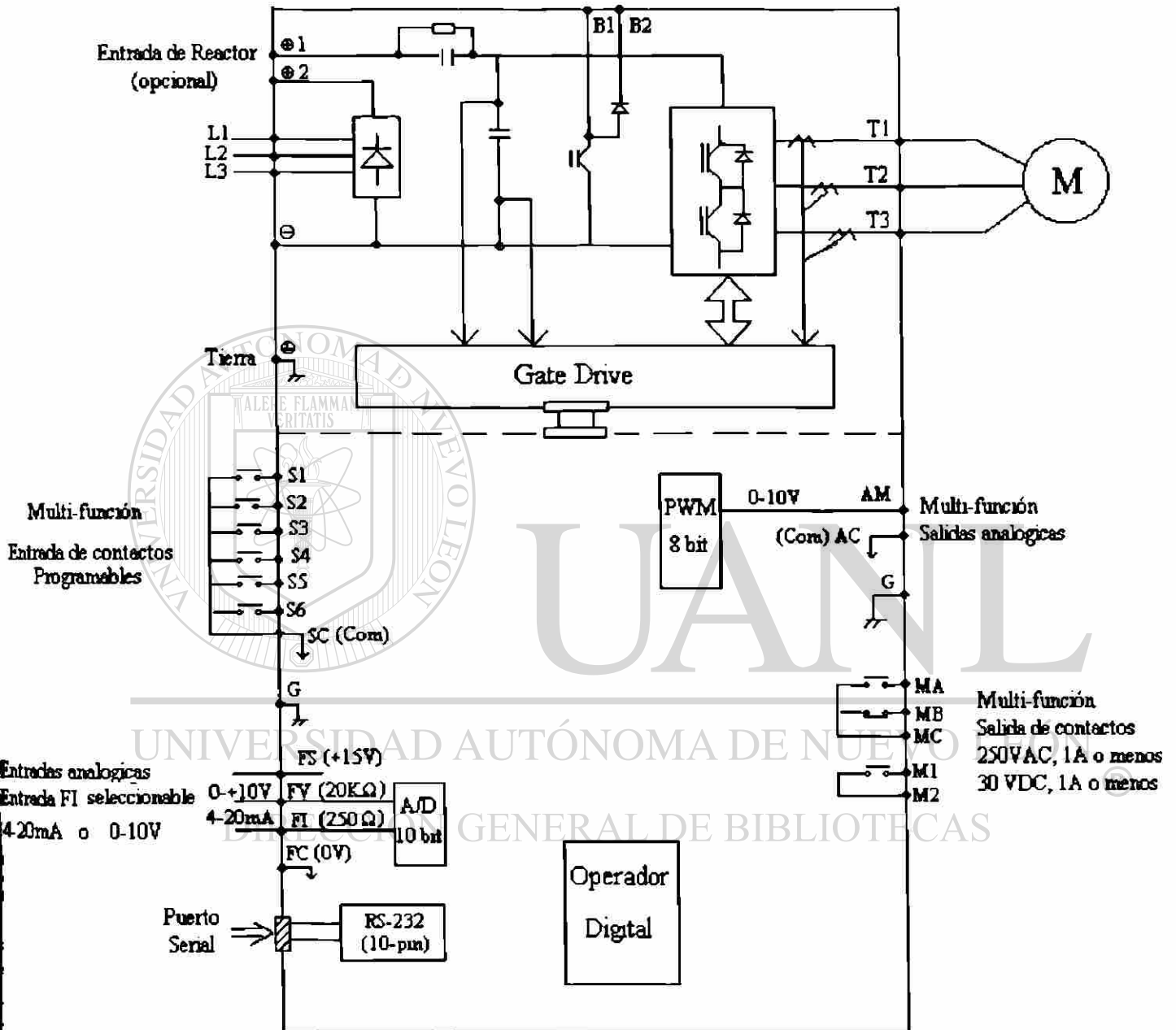


Figura 120 Diagrama de Conexiones para un Inversor Marca Safronics, Modelo Gp5 (Tipo Convencional)

## 11.12 Algunos Inversores Utilizados En La Industria Marca: Safronics

### Mini Drive VSM

- Capacidades ¼ a 2 HP 230VCA / 460 VCA
- Protección instantánea de sobrecorriente de hasta 250% a bajas velocidades
- Operación local o remota
- Montaje en riel

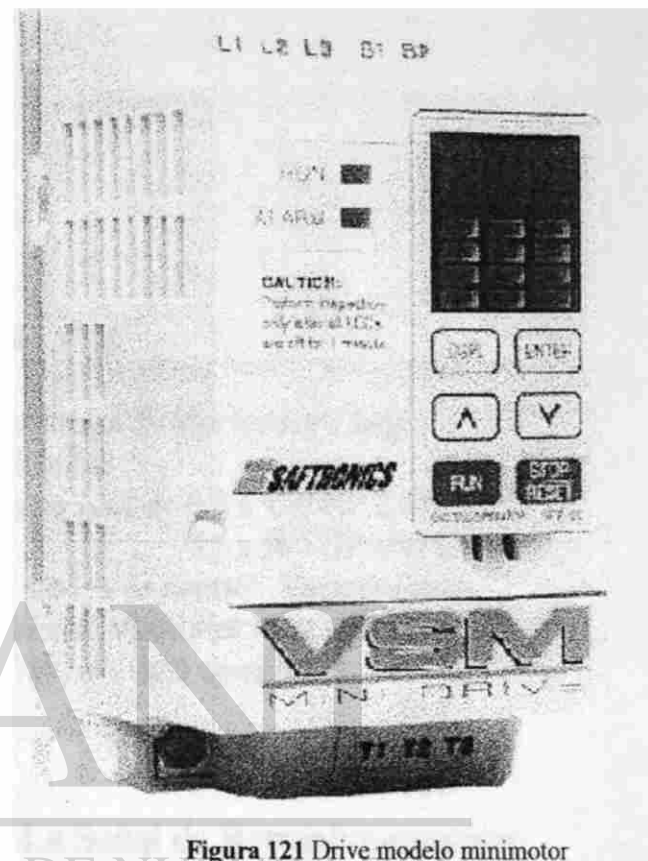
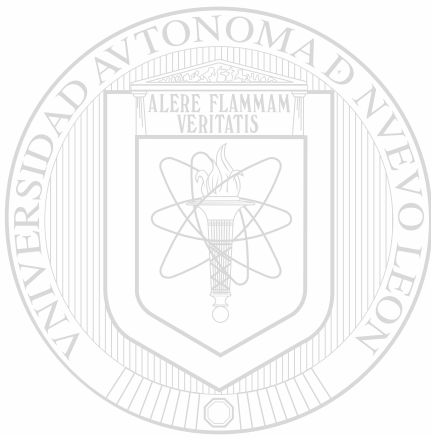


Figura 121 Drive modelo minimotor

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### Modelo GP5

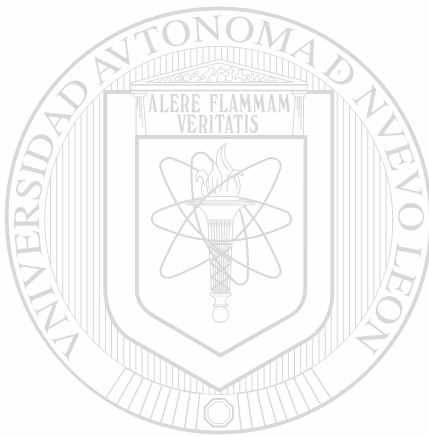
- Capacidades desde 3 a 100 HP 230VCA  
3 a 400 HP 460 VCA
- Protecciones de sobrecarga de 150% por 60 seg. corto circuito, entre otras
- Operador digital amigable al usuario
- Uso convencional con rango 40 – 1
- Aplicaciones Torque Constante o Variable
- Control PID integrado

### Modelo PC3

- Capacidades  $\frac{3}{4}$  a 5 HP 460 VCA / 230 VCA
- Protección contra parpadeos en línea por 2 seg.
- Capacidad de sobrecarga a torque constante  
150% por un minuto (200% pico)

### Modelo VG5

- Respuesta de alto torque a baja velocidad
- Capacidad de 0.5 a 100 HP 230 VCA  
0.5 a 500 HP 460 VCA
- 4 modos de control: Vectorial lazo abierto, Vectorial lazo cerrado, V/Hz y V/Hz en lazo cerrado



## 11.13 Dispositivos Utilizados Para Obtener La Señal de Retroalimentación en Los Inversores de Frecuencia

Existen dos tipos de dispositivos:

- Sensores Ópticos
- Sensores Magnéticos

Dentro de los sensores Ópticos tenemos:

**Sensores Incrementales.**

Los encoders ópticos utilizan un rotor con un patrón de conteo, el cual interrumpe la fuente de luz del led y cambia la salida de los sensores fototransistores. La señal es amplificada y limpiada internamente. Los encoders ópticos se proveen operación desde velocidad cero y tienen una alta resolución.

## Cuadratura

La salida de cuadratura permite el monitoreo de la dirección para procesos que puedan trabajar en reversa, o que deben mantener una posición cuando se tenga oscilación mecánica.

La señal de cuadratura bidireccional es recomendada para la mayoría de las aplicaciones de posición, velocidad y longitud.

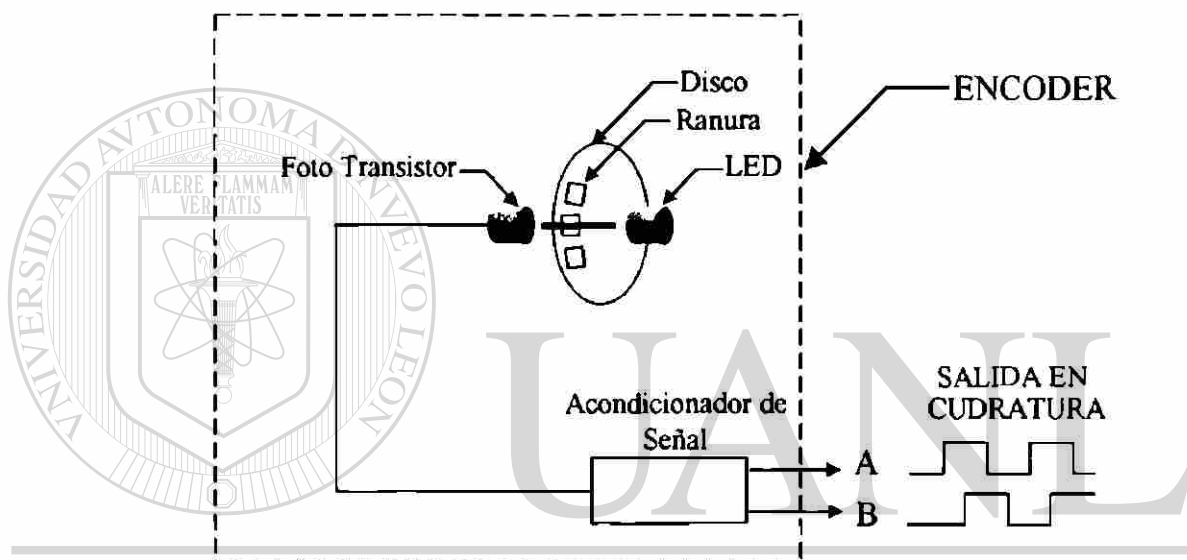


Figura 122 Diagrama de encoder óptico

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Dentro de los sensores Magnéticos tenemos:

Reluctancia Variable.

Estos dispositivos utilizan dientes de un engrane ferromagnético para distorsionar el flujo, causando un cambio en la reluctancia. Un voltaje pulsante proporciona, causando un cambio en la reluctancia. Un voltaje pulsante proporcional al movimiento mecánico es generado en el embobinado. Estos son dispositivos precisos para una máxima confiabilidad. La operación a baja velocidad es limitada alrededor de los 50 rpm.

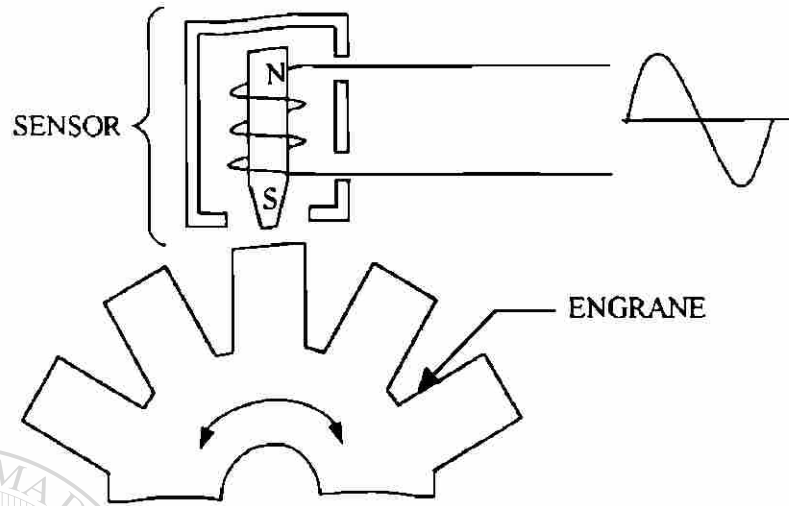


Figura 123 sensor de Reluctancia Variable

**Magneto Resistivos.**

Estos dispositivos contienen un circuito tipo puente altamente sensible, el cual reacciona al movimiento de la dentadura del engrane ferromagnético. Este desbalance del circuito tipo puente es amplificado para crear la señal de salida. La operación a velocidad cero, alta confiabilidad, y un amplio rango de temperatura, son sus características principales.

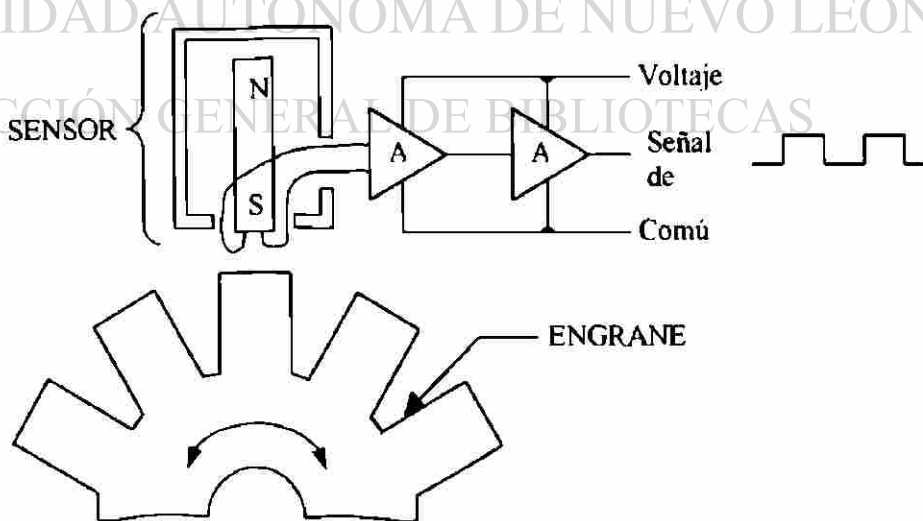


Figura 124 Sensor Magneto-Resistivo



## 11.14 Variadores De Velocidad Para Corriente Directa

En el pasado, el control típico de un motor de c.d. fue realizado usando un generador de voltaje variable para suministrar un voltaje discreto y una polaridad requeridos para obtener la velocidad del motor. El campo del motor fue controlado por un excitador de campo, el cual fue por lo general un encapsulado común con el generador.

A continuación mostraremos en un diagrama a bloques los principales componentes internos de un Drive de c.d. (Esto es en la actualidad).

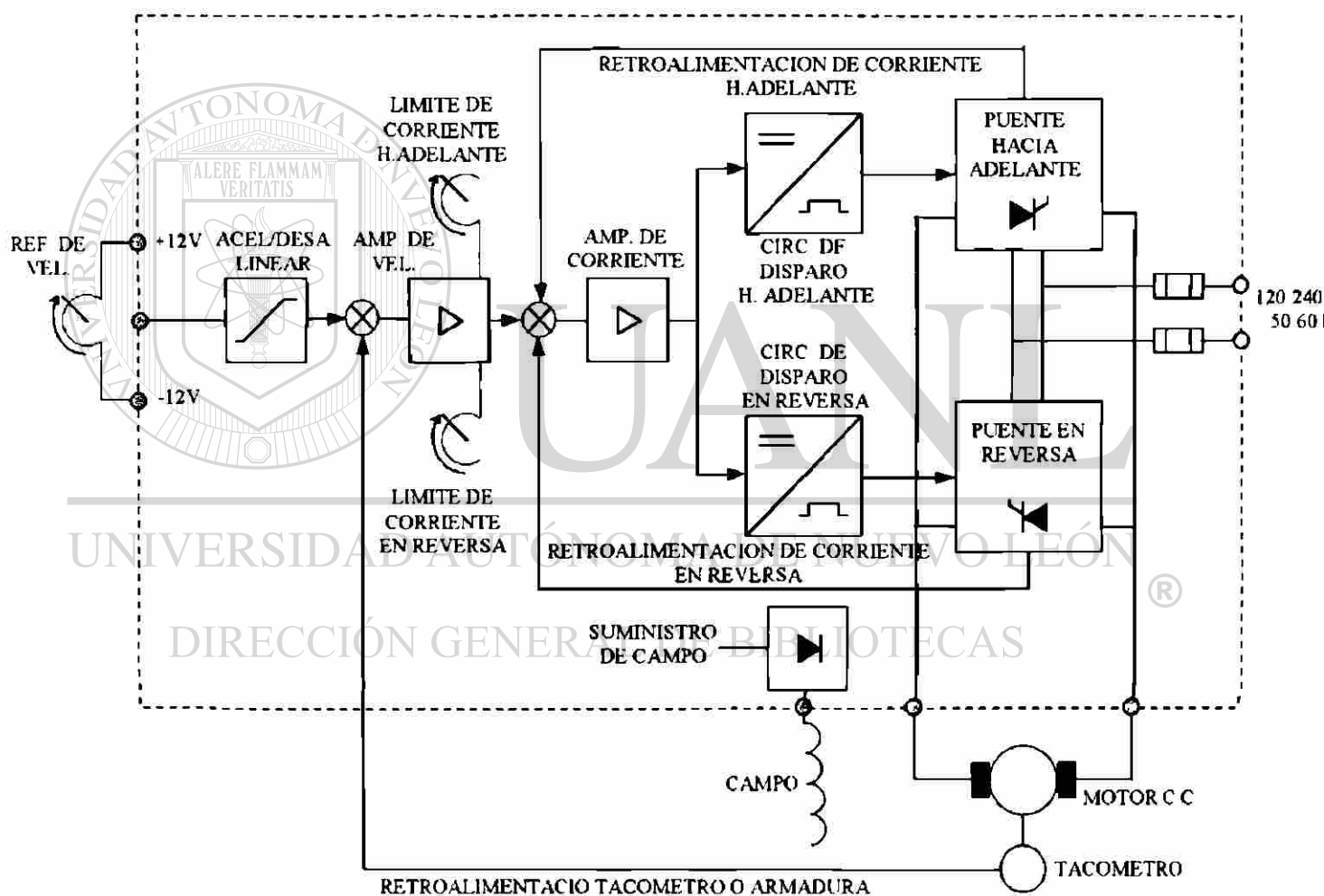


Figura 125 Diagrama a bloques del control interno de un drive de c d

## 11.15 Control de Estado Sólido en los Variadores de Velocidad de Motores de C.C.

En la década de los 60's, con el desenvolvimiento de los SCR'S (Rectificador Controlado de Silicón), los cuales fueron mucho más eficientes para la fuente de poder de los drives de c.d. de voltaje variable. Sistemas eficientes incrementados desde un 65% a un 90%, y requirieron de mucho menos espacio para el gabinete de control. De cualquier forma el progreso, generalmente tiene su precio. La desventaja de los SCR'S y otros dispositivos de switcheo de estado sólido, es que tienen ciertas perturbancias en la línea de alimentación, por ejemplo: armónicos, variaciones de factor de potencia. Una regla general para los drives de C.D., es que siempre tengan un transformador de aislamiento, o reactores en la entrada o inductores adelante del drive para ayudar a solucionar estas perturbancias. Además interferencias electromagnéticas y de radio frecuencia, pueden perturbar otros dispositivos sensitivos, como computadoras, instrumentación y otros tipos de equipos electrónicos.

## 11.16 Métodos de control y aplicación

Un esquema de control básico usado en drives de estado sólido, siempre requiere una señal de referencia o de comando, y una señal de retroalimentación para medir el funcionamiento. Este concepto es necesario ya sea que nosotros queramos controlar la velocidad o el torque, dando los requerimientos de aplicación para el drive.

En los siguientes diagramas se discutirá cuando cada uno de estos métodos serán usados y que efectos debemos considerar para medir sus resultados.

El tiempo de la combinación para el sistema de drive, motor y la carga que toma, respuesta del comando de referencia y medición de error de la señal de retroalimentación es llamada **RESPUESTA**. El error que existe entre el ajuste de la velocidad original y el resultado después de recibir la carga se llama **REGULACION**.

Un drive de c.d. proveerá de una fuente de voltaje de c.d. variable de tal manera que la velocidad de un motor de c.d. puede ser controlada, también proveerá de limitantes tanto para el motor como para su carga aplicada.

Para proveer de un voltaje variable de c.d. es empleado el uso de SCR'S. Debe haber alguna forma de circuito para hacer que tanto la velocidad deseada y la velocidad real sean una realidad. Aplicando una señal a la sección del rectificador de un drive el motor puede

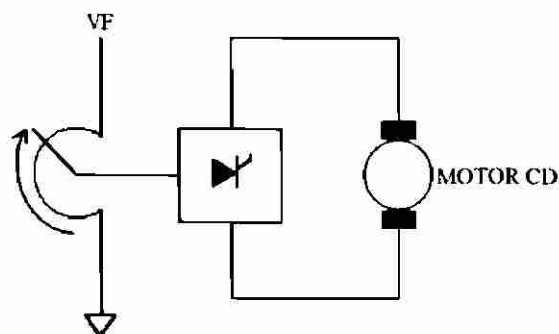


Figura 126 Sistema de control de lazo abierto

hacerse que corra a una velocidad. Sin tener una retroalimentación desde el motor a este tipo de sistema es llamado Lazo abierto (figura 126). Tan pronto como nosotros tengamos una señal de retroalimentación desde el motor, tenemos un sistema de Lazo Cerrado. Con un sistema de lazo cerrado nosotros podemos ahora mantener una velocidad deseada.

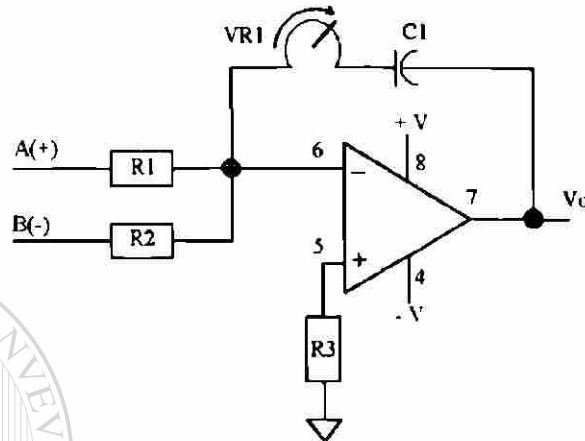


Figura 127 Amplificador de error

Las señales de referencia (A) y la de retroalimentación (B) son alimentadas dentro de un OPAMP. LA unión entre la señal de referencia y la señal de retroalimentación forman un punto de suma. Las polaridades de las dos señales deben ser opuestas de tal manera que cuando sean iguales, el punto de suma será cero. El amplificador de error detectará a ambas señales y si existe una variación habrá un cambio en la salida del amplificador el valor de este cambio será controlado por VR1 (Potenciómetro)

La figura 128 muestra un sistema de lazo cerrado donde  $V_a$  es un amplificador de error que detecta la señal de referencia como la de retroalimentación

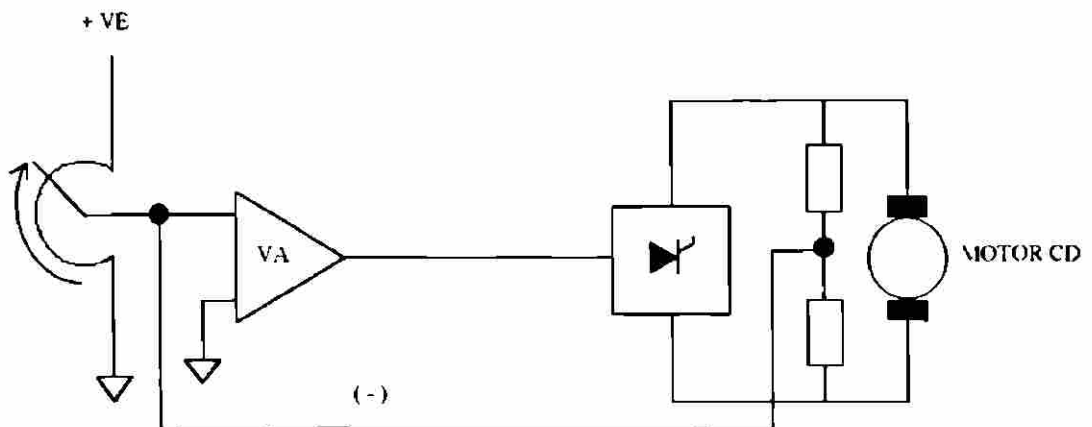


Figura 128 Sistema de control de lazo cerrado

Se sabe que la manera de controlar la velocidad de un motor de c.d. es controlando el disparo de los SCR'S. La señal de referencia y la señal de retroalimentación ajustaran automáticamente la salida del amplificador  $V_a$  el cual controlara el ángulo de disparo para mantener la velocidad deseada. Como sea un motor va a tomar tanta corriente como la carga lo requiera. Esto obviamente no es bueno ni para el motor y ni para los SCR'S que son usados para el control de dicho motor. Por lo tanto otra etapa es agregada al drive de c.d. (figura 129) Esta etapa detecta la corriente que maneja el motor y con un circuito limitara la magnitud de corriente que el motor puede soportar o manejar. Este también es un amplificador de error y es conocido como amplificador de corriente ( $I_a$ ).

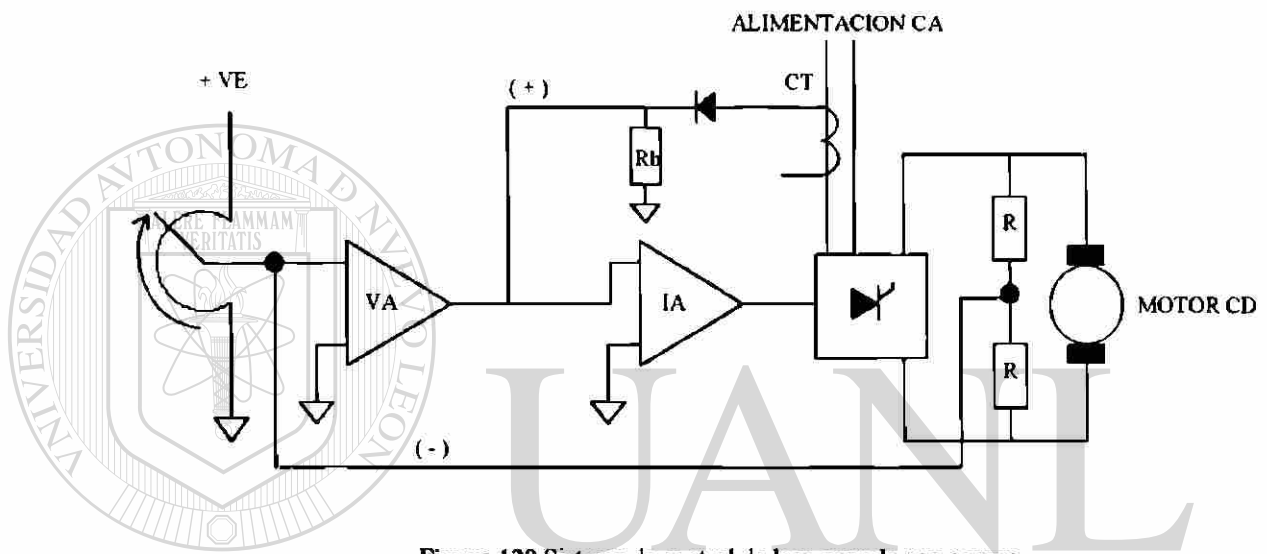


Figura 129 Sistema de control de lazo cerrado con opamp

El amplificador  $I_a$  trabaja exactamente con el mismo principio que el amplificador  $V_a$ , es decir igualmente las polaridades de las señales que alimentan al circuito (referencia y retroalimentación) deben ser opuestas. La importancia de las polaridades opuestas entre la señal de referencia y la de retroalimentación están fuera de este estudio.

Refiriéndonos a la figura 129 si el voltaje de retroalimentación fuese cambiado de negativo a positivo, la salida de  $V_a$  se saturaría negativamente y nunca cambiaría. Asumiendo que la carga en el motor no es excesiva, la salida de la señal de retroalimentación de corriente no tendría efecto sobre el punto de suma entre los amplificadores  $V_a$  e  $I_a$ , por lo tanto esto podría causar que la salida  $I_a$  se sature positivamente y el ángulo de disparo de los SCR'S estaría al máximo haciendo que el motor corriera a una muy alta velocidad. Ajustando el potenciómetro de referencia no tendría el mismo efecto como las señales del motor que estarían manejando los amplificadores.

Cuando las señales son de polaridades opuestas, la señal de referencia original (Positiva) manejarán a los amplificadores para que hagan correr al motor a su máxima velocidad sin embargo tan rápido como exista un voltaje hacia el motor una señal de retroalimentación será detectada en el punto de suma. Esta señal siendo de polaridad opuesta a la señal de referencia tendrá un efecto nulo y las salidas de los amplificadores

serán ajustadas para mantener la salida deseada. Una vez que el amplificador de  $V_a$  esta estable y regulando las señales cualquier cambio en la referencia causara que la salida de los amplificadores cambien. Por ejemplo si la carga se incrementa la señal de retroalimentación de corriente se incrementa lo cual haría tender al motor a que bajara la velocidad, los SCR'S serian disparados en referencia al bajo valor de referencia de salida de  $I_a$ . Este decremento de voltaje de armadura crearia un error que seria detectado en el punto de suma de  $V_a$  y la salida cambiaria para corregirlo suministrando una mayor salida para contrarrestar el incremento de la corriente de retroalimentacion.

#### 10.xxx Regulación del motor

Hay tres diferentes maneras para controlar un motor de corriente directa a traves del uso de un drive de c.d.

- A) regulación de voltaje
- B) regulación de velocidad
- C) regulación de corriente

La figura 129 muestra un simple block de un drive regulado por voltaje. La retroalimentacion del motor hacia el amplificador  $V_a$  llega a través de una de red de divisor de voltaje entre la armadura. Este sistema regulara el voltaje aplicado al motor, sin embargo la velocidad no será constante. Una carga aplicada provocara que el motor baje su velocidad, debido al incremento de caídas de voltaje a través de una resistencia de la armadura conocidas como caídas de  $I_r$ . Para eliminar este problema una señal positiva de retroalimentacion se agrega al punto de suma de  $V_a$ .

La figura 130 muestra el circuito equivalente de un motor y muestra el voltaje  $V$  que se necesita para mantener una velocidad estable.

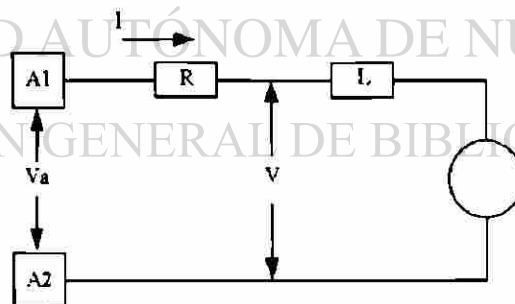


Figura 130 Circuito equivalente de motor

Esto es llamado compensación  $I_r$ . El suministro para esta señal llega a través del circuito de retroalimentacion de corriente por lo tanto solamente es efectivo con cargas aplicadas (figura 131) Con un sistema de regulación de voltaje la regulación de velocidad se limita alrededor de 3%

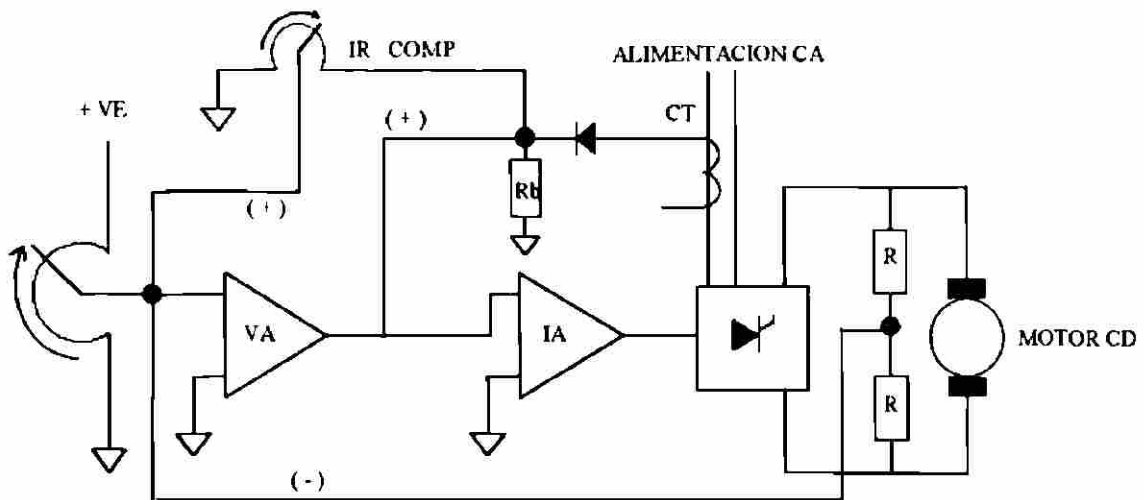


Figura 131 Sistema de regulación de velocidad del 3%

## 11.17 Regulación de Velocidad

En un control de regulación de velocidad (figura 132), la señal de retroalimentación viene de un tacogenerador que está directamente acoplado a la flecha del motor. Eso significa que la señal será proporcional a la velocidad real de motor. Cualquier variación en la velocidad causada por cambios en la carga será compensada por el amplificador Va, el cual ahora será llamado amplificador de velocidad. Hay que notar que cuando se utiliza este sistema no existen ajustes en el compensador Ir es decir que el compensador Ir ya no se deberá usar.

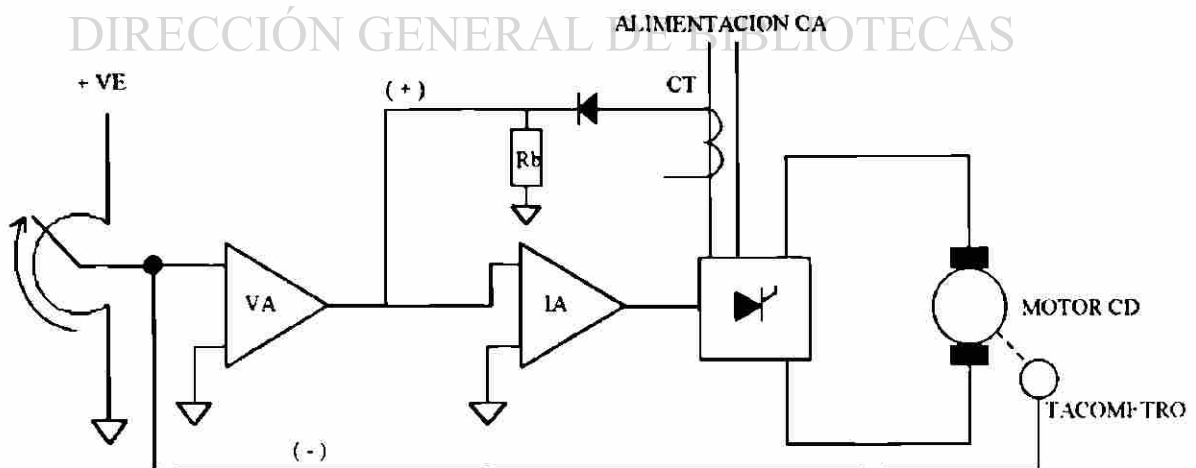


Figura 132 regulador de velocidad usando tacogenerador

Dependiendo de la calidad y tipo del tacogenerador usado, la regulación de velocidad puede ser del 1% o menos, es decir que es muy preciso.

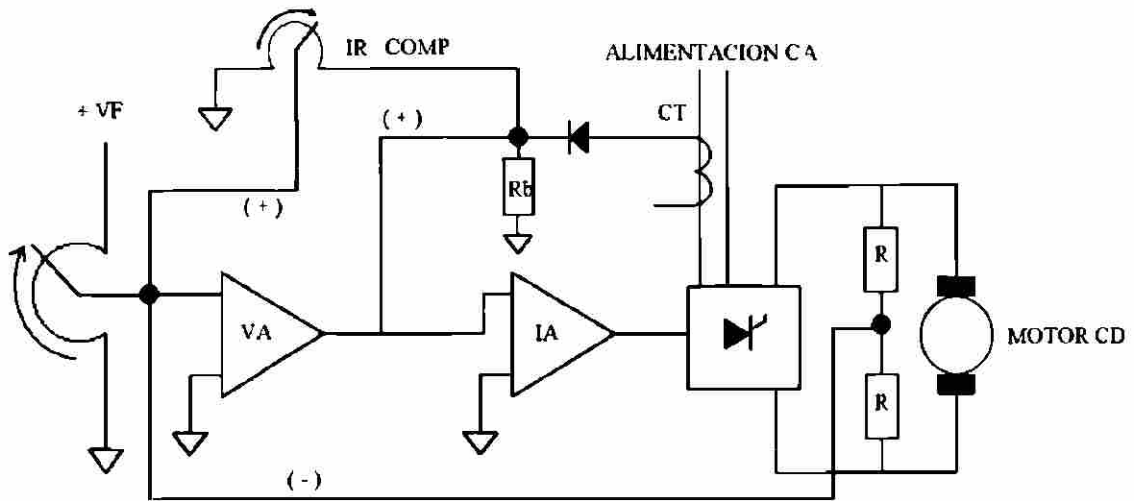


Figura 131 Sistema de regulacion de velocidad del 3%

### 11.17 Regulación de Velocidad

En un control de regulación de velocidad (figura 132), la señal de retroalimentación viene de un tacogenerador que está directamente acoplado a la flecha del motor. Eso significa que la señal será proporcional a la velocidad real de motor. Cualquier variación en la velocidad causada por cambios en la carga será compensada por el amplificador  $V_a$ , el cual ahora será llamado amplificador de velocidad. Hay que notar que cuando se utiliza este sistema no existen ajustes en el compensador  $I_r$  es decir que el compensador  $I_r$  ya no se deberá usar.

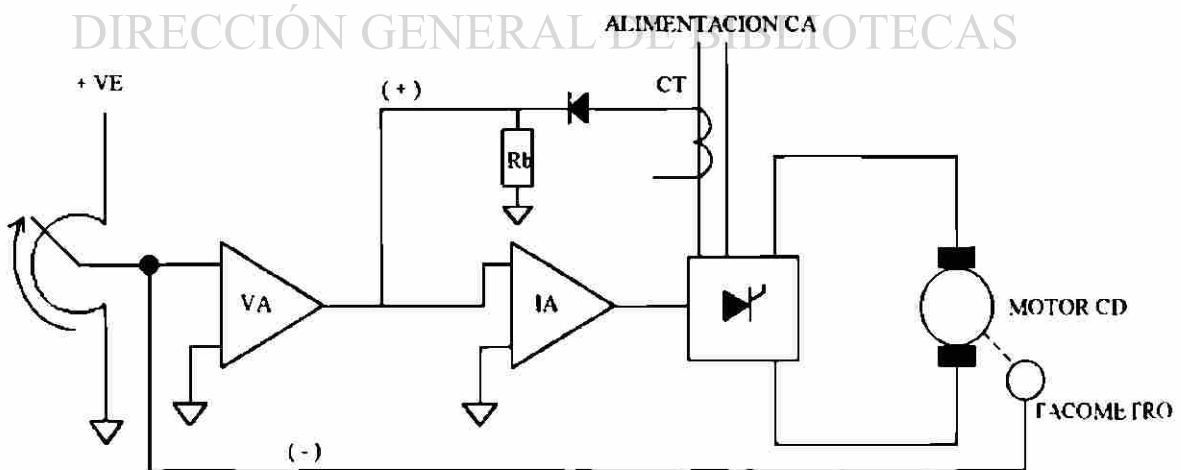


Figura 132 regulador de velocidad usando tacogenerador

Dependiendo de la calidad y tipo del tacogenerador usado, la regulación de velocidad puede ser del 1% o menos, es decir que es muy preciso

Si por alguna razón la señal del tacogenerador se pierde, el drive hará que los SCR'S, disparen al máximo la velocidad del motor haciendo que se desboque. Para evitar esto se puede instalar un switch electrónico, el cual intercambiara de regulación de voltaje a regulación de velocidad al arranque, una vez en marcha se detecta si la señal del tacogenerador ha sido perdida para cambiar a regulación de voltaje y evitando así que el motor se desboque. (Figura 133). La señal del tacogenerador sensara condiciones de sobre velocidad para posteriormente ser corregidas

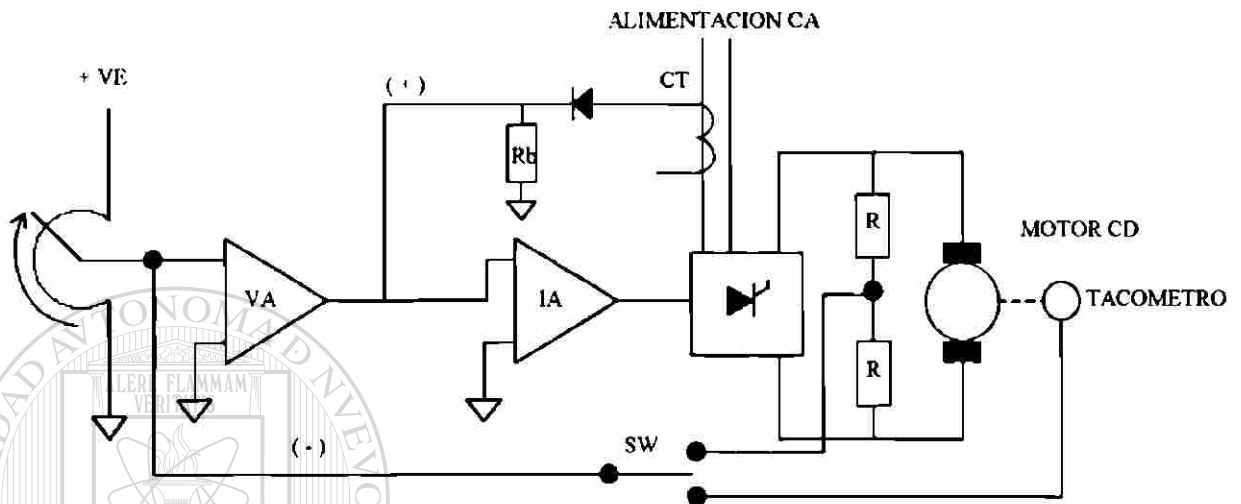


Figura 133 regulador de velocidad modificado con tacogenerador

## 11.18 Regulación de corriente

La figura 134, muestra un diagrama a bloques para un control con regulación de corriente. Lo que antes era la entrada de referencia vía un potenciómetro, ahora ha sido conectado directamente a la fuente de alimentación positiva. Eso significa que la salida de  $V_a$  esta ahora saturada negativamente y la señal de retroalimentación no tendrá efecto. La conexión que se muestra es para retroalimentación con voltaje pero podría ser conectada para retroalimentación de velocidad dependiendo de las características físicas del motor.

Cualquier método de conexión no tiene importancia en la operación del controlador mientras que el controlador este conectado para regulación de corriente.

La salida de  $V_a$ , la cual es mantenida negativa es usada como alimentación para el potenciómetro de referencia. El otro extremo del potenciómetro es conectado al punto de suma de la entrada de  $I_a$ , por lo que el drive ahora regulara la corriente que maneja el motor.



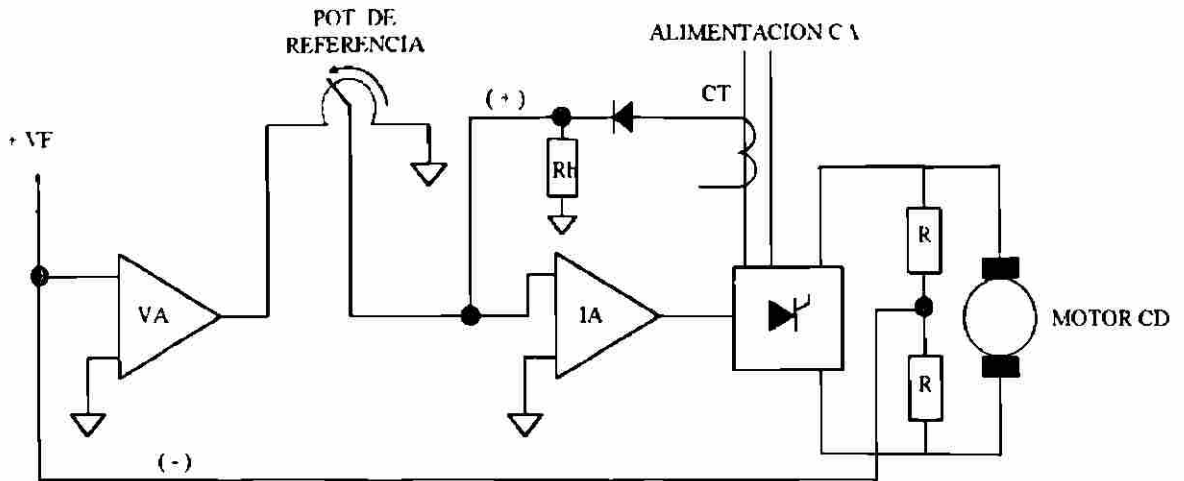


Figura 134 Diagrama a bloques para un regulador de corriente

Cada uno de los tipos de reguladores antes mencionados tienen un lugar en la industria dependiendo de su aplicación. Algunas veces más de un tipo de regulación es requerido para una aplicación específica pero nunca al mismo tiempo. El cambiar de un tipo de regulación a otro, es logrado por un control lógico externo.

### 11.19 Limitador de Corriente

No importando cual tipo de regulación se este usando, una parte muy importante de un controlador es la habilidad para limitar la corriente manejada por el motor. Esto no es solamente necesario para proteger los elementos en la unidad del drive, sino que también para limitar el manejo del motor. Hay diferentes métodos para lograr o alcanzar límites de corriente.

En la figura 135, el potenciómetro IL es energizado por el circuito de retroalimentación de corriente, mientras que el motor trata de tomar más corriente que la especificada por el potenciómetro IL, Q1 se enciende. La salida de IA será retardada y el voltaje del motor será reducido.

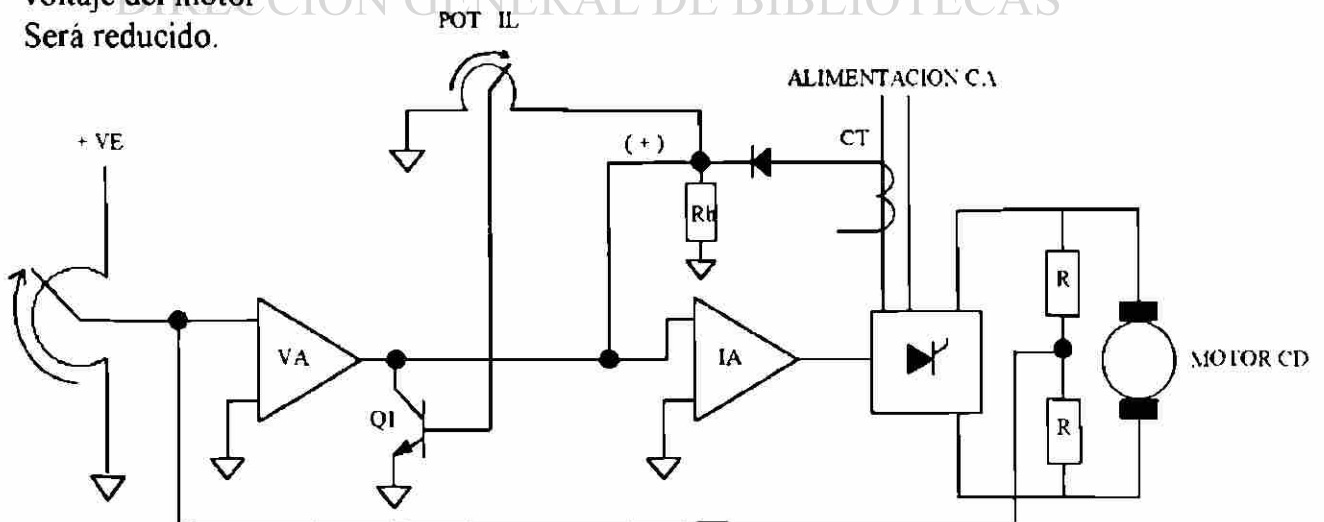


Figura 135 Regular de velocidad con limitador de corriente

Drives electrónicos de velocidad variable de corriente directa usados para el control de motores industriales standard, caen en dos principales categorías drives de Transistores y Tiristores. Los drives de transistores son usualmente de mucho menor valor de potencia y son típicamente usados en aplicaciones especiales, mientras que los drives de Tiristores están disponibles en rangos de valores desde unos cuantos cientos de watts hasta megawatts y tienen una gran variedad en la industria y en otras partes.

El tiristor es un dispositivo semiconductor de potencia formado por un diodo rectificador que puede solamente conducir cuando está polarizado directamente pero que tiene un tercer electrodo, la compuerta, con el cual el dispositivo puede ser puesto en conducción por medio de pulsos de disparo. Una vez disparado el tiristor continuará conduciendo mientras siga en polarización directa; si la polaridad es invertida el tiristor se apagará. Esta inversión de polaridad es convenientemente alcanzado conectando al tiristor a una fuente de voltaje de alterna.

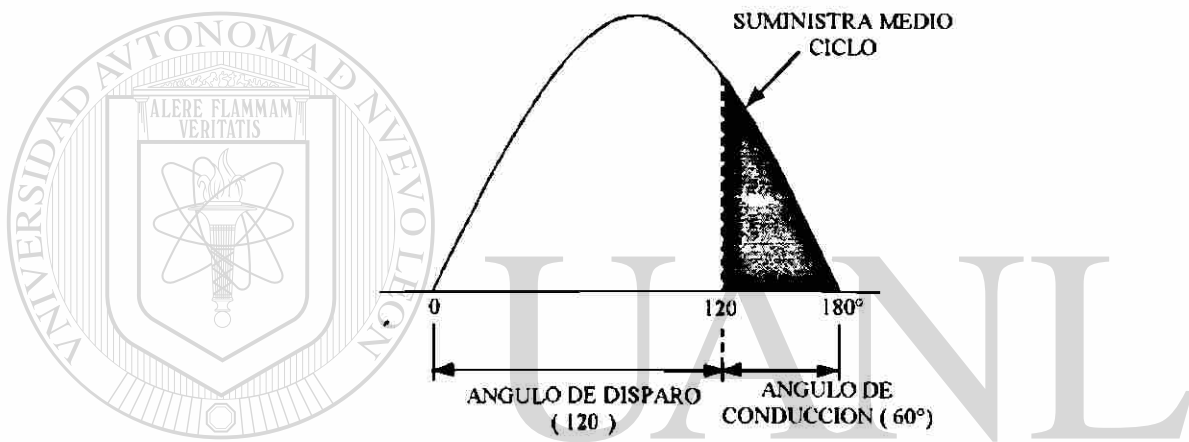


Figura 136 Angulo de disparo y de conducción de un tiristor

## 11.20 Drives Unidireccionales (No regenerativos)

Por definición la salida de corriente de un rectificador es unidireccional, por lo que el torque producido por el motor estará en un sentido de rotación. En aplicaciones donde solamente una dirección de rotación es requerida, y que la carga pueda ser detenida en forma de paro libre, esto es adecuado.

## 11.21 Drives Bidireccionales (Regenerativos)

Existen sin embargo muchas aplicaciones en las cuales la rotación de reversa es necesaria, o donde grandes cargas de alta inercia deben ser desaceleradas. En tales casos, dos puentes de tiristores son conectados en paralelo inverso, como se muestra en la figura 137. Cuando el puente uno está conduciendo, la corriente que fluye en el motor, es de A1 a A2. El flujo de corriente es invertido cuando el puente dos conduce, y por lo tanto el torque del motor se invierte. Este efecto se puede utilizar para invertir la rotación del motor y para proveer de un torque de frenado.

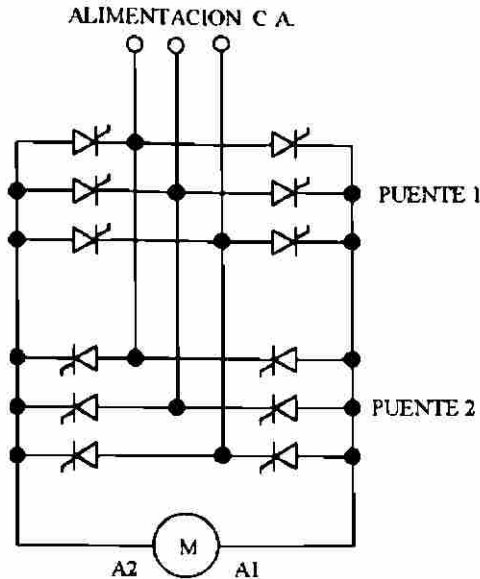


Figura 137 Esquema de control bidireccional regenerativo

El arreglo descrito antes, es conocido como drive de cuatro cuadrantes, debido a que es capaz de operar en cualquiera de los 4 cuadrantes del diagrama de torque contra velocidad (figura 138). En el cuadrante 1 tanto el voltaje y corriente están en la dirección hacia adelante y por lo tanto la velocidad y torque están en la misma dirección. En forma similar, en el cuadrante tres, tanto la velocidad y torque son negativos; esto corresponde a un motor girando en la dirección de reversa.

En los cuadrantes 2 y 4, la velocidad y el torque están mutuamente en direcciones opuestas, esto quiere decir que el torque del motor esta opuesto a su rotación, dando un efecto de frenado. Por consiguiente tenemos que la energía cinética mecánica de la carga ha sido convertida en energía eléctrica; el motor se comporta como generador y el sistema general entrega potencia a la alimentación. Este comportamiento es conocido como regeneración y tiene dos aplicaciones principales. La mas usual es el Frenado regenerativo de una masa en rotación para proporcionar un rápido y controlado paro.

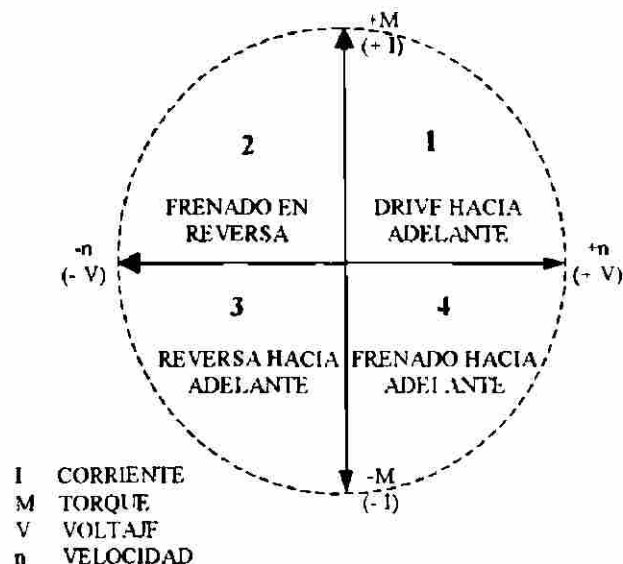


Figura 138 Cuatro cuadrantes de trabajo de un drive de c c

Otra aplicación importante de la regeneración es en los Dinamos, donde un drive regenerativo es usado para proveer una carga para una fuente de potencia mecánica. Ambos para pruebas bajo cargas y para medición de su salida.

Una mayor ventaja de un drive de 4 cuadrantes es la facilidad en la que el motor puede ser puesto en reversa simplemente cambiando los puentes. Un drive que solamente tiene un puente de tiristores, puede ser puesto solamente en reversa por medio de contactores, los cuales invierten las conexiones a la armadura o el campo del motor. Figura 139.

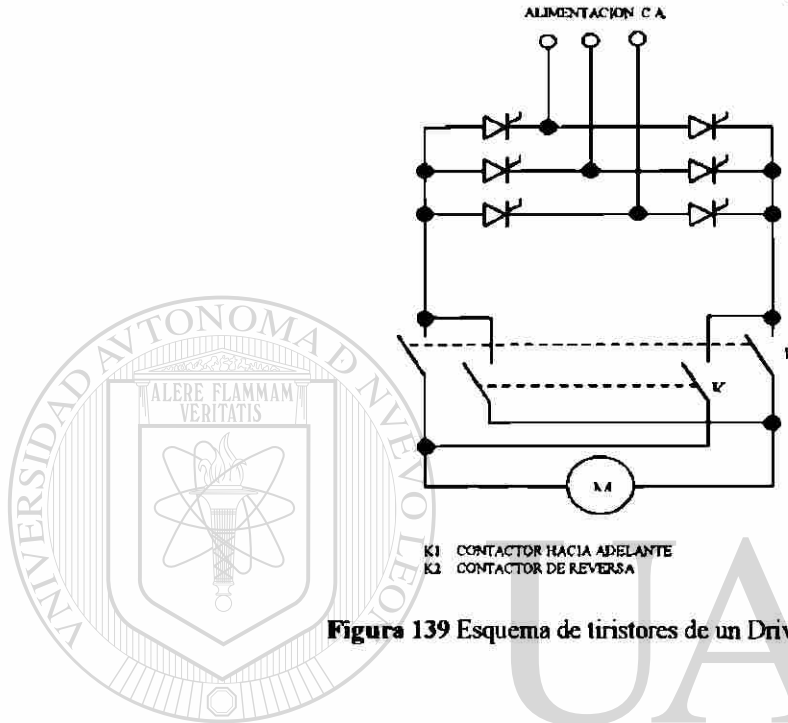


Figura 139 Esquema de tiristores de un Drive de c.c. regenerativo

## 11.22 Frenado Dinámico.

Debido a que el freno regenerativo depende de la energía que se regresa del motor a la alimentación, no puede trabajar si la fuente de alimentación falla debido a un fusible abierto o un corte de energía. El frenado dinámico de los drives de 4 cuadrantes es encontrado usualmente como una manera de falla-segura para parar al motor y su carga, y como la única manera de frenar drives con un solo puente de tiristores.

Resistencias de frenado dinámico de valores pequeños están construidas usualmente en cerámica mientras que aquellas de valores son fabricadas en acero, metal expandido, hierro, todas estas teniendo grandes áreas de disipación por el calor producido durante el frenado.

Desde que la energía cinética del motor y su carga es convertida en calor por la resistencia de frenado, es importante calcularlas correctamente para el trabajo a desempeñar, tomando en cuenta la inercia de la carga y el número de paros por hora.

## 11.23 Drives de Transistores

Los drives de tiristores tienen bastantes limitaciones importantes que son superadas por los drives de transistores de C.D.; algunas de estas limitaciones son las siguientes:

- El rizo de salida de frecuencia es determinado por la fuente y es, para una fuente de frecuencia de 50 Hz, 100 Hz para equipo monofásico, y 300 Hz para equipos trifásicos. Esto significa que un alizamiento adicional es requerido cuando se usan maquinas de alta velocidad, motores de imanes permanentes o motores de circuitos impresos, todos ellos con una baja inductancia en la armadura.
- Debido al retraso inherente en la operación del tiristor, el ancho de bando del lazo de control de corriente del convertidor del tiristor es limitado aproximadamente 25 Hz, el cual es muy bajo para muchas aplicaciones de servo drives.
- Los tiristores rectificadores de fases controlados tienen un factor de potencia de entrada inherentemente bajo, particularmente a voltajes de salida bajos.
- Protecciones electrónicas de corto circuito no son posibles con los convertidores de tiristores. Esta protección es normalmente lograda con fusibles.

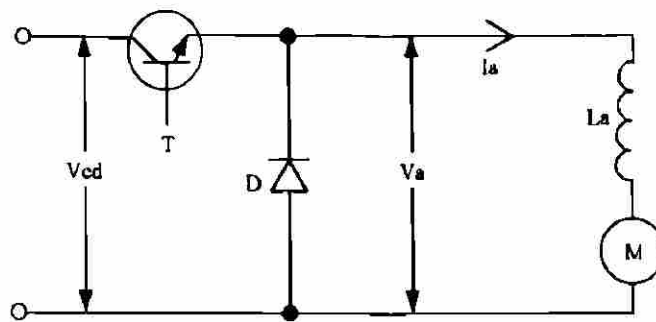
Todos estos problemas pueden ser superados usando transistores. Sin embargo, el convertidor de transistores es más complejo y menos eficiente que su equivalente en tiristor. Además, los transistores todavía no son disponibles en valores de corriente y voltajes altos y su uso está limitado generalmente a cargas de menos de 150 kWatts.

## 11.24 Aplicaciones de los drives de transistores de C.D.:

- Servo drives de C.D.
- Drives de baterías de tracción
- Drives de ferrocarriles de tracción
- Drives fraccionarios para motores de imanes permanentes

## 11.25 Convertidores de un solo cuadrante o Chooper

El más básico de los convertidores de C D a C D variable, algunas veces conocido como chooper se muestra en la figura 15. La salida de voltaje es cambiada por modulación de ancho de pulso, que es el variar el tiempo el cual el transistor es encendido. El voltaje aplicado al motor es por lo tanto una señal cuadrada de variación periódica. Debido a que el motor es inductivo, la forma de corriente es en forma lisa o alisada, el diodo de rueda libre (D) cargando la corriente mientras que el transistor es apagado.



$V_{cd}$  = alimentación de voltaje de c.c.  
 $V_a$  = voltaje c.d. de armadura  
 $L_a$  = inductancia de armadura  
 $i_a$  = corriente de armadura  
 $i_a$  = corriente instantánea de armadura

CIRCUITO BASICO DE UN SOLO CUADRANTE

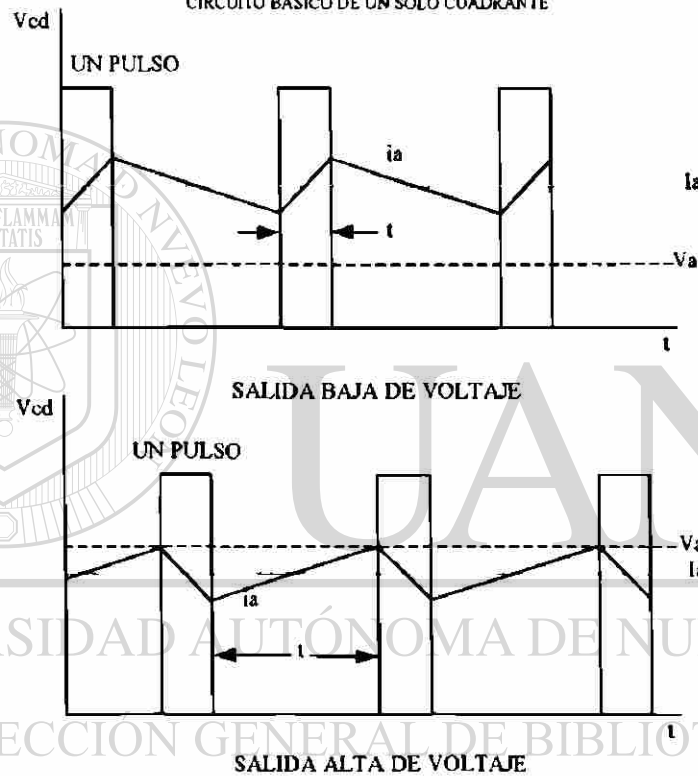


Figura 140 Circuito básico de un solo cuadrante y formas de onda del voltaje

La fórmula básica relacionando las variables en este circuito son las siguientes.

$$V_a = V_{cd} * t * f$$

$$\Delta i_a = \frac{V_{cd}}{4L_a * f}$$

$f$  = frecuencia del transistor (un pulso)  
 $i_a$  = máxima desviación de corriente de armadura  
 $L_a$  = inductancia del motor

El circuito es solamente capaz de suministrar corriente y voltaje unidireccional al motor y por lo tanto no es capaz de operación en 4 cuadrantes.

Las aplicaciones para estos circuitos son limitadas normalmente a drives por debajo de los 3 kWatts y aplicaciones de variación de velocidad simple.

### 11.26 Convertidores de 2 cuadrantes.

En orden de alcanzar una operación completa de 4 cuadrantes un convertidor debe ser capaz de suministrar voltaje y corriente bidireccional al motor. Un circuito que es capaz de operar en dos cuadrantes (girar y frenar en una sola dirección), se muestra en la figura 16. Este convertidor es capaz de invertir el flujo de corriente al motor pero incapaz de invertir el voltaje del motor y por lo tanto su velocidad. Durante el motorizado el convertidor opera como chooper (drive de un solo cuadrante) básico, con T1 y D2 llevando corriente. Durante el frenado T1 esta deshabilitado y T2 controla la corriente. Durante sus periodos de encendido, la corriente del motor se hace negativa, limitada solamente por la inductancia "La" del motor. Cuando T2 se apaga, la única trayectoria para la corriente es a través de D1 de regreso a la fuente, y por lo tanto el circuito es regenerativo.

Debido a que ese circuito no es capaz de invertir la velocidad del motor, es solamente utilizado en aplicaciones unidireccionales. Sin embargo, debido a su simplicidad es algunas veces utilizado en aplicaciones de tracción donde la reversa se logra mediante un contactor para invertir la alimentación de corriente de la armadura y campo.

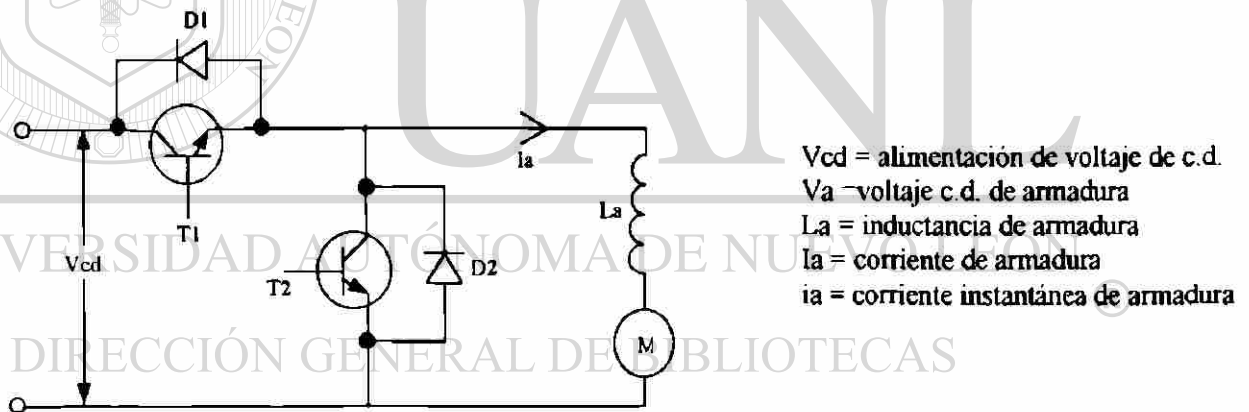
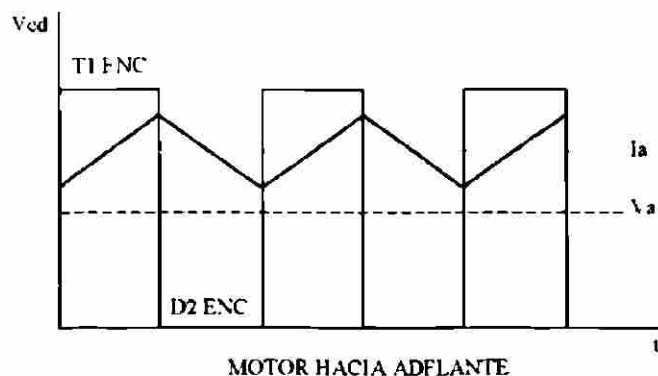


Figura 141 Circuito básico de 2 cuadrantes



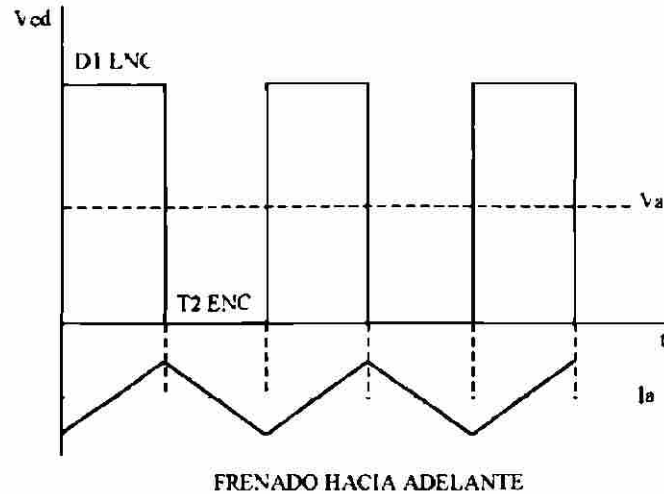


Figura 142 Formas de onda del voltaje para un circuito de 2 cuadrantes

### 11.27 Convertidores de 4 cuadrantes

La figura 143, muestra un convertidor básico de 4 cuadrantes capaz de suministrar un voltaje y corriente invertidos y por lo tanto reversible y regenerativo.

Durante el motorizado, transistores de salida positivos T1 y T4 son habilitados durante el periodo de encendido, mientras que los diodos D2 y D4 conducen durante el periodo de apagado. Cuando D2 y D4 conducen la alimentación del motor es invertida y consecuentemente el voltaje es reducido a cero al 50% del ciclo de trabajo. Con los transistores T2 y T3 conduciendo, la corriente es invertida y por lo tanto se obtiene una operación de 4 cuadrantes completa.

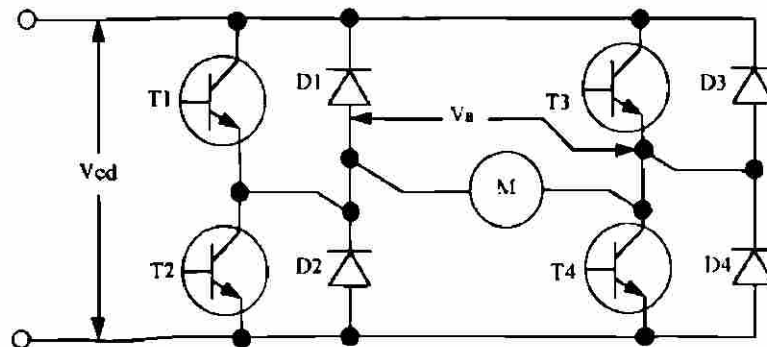
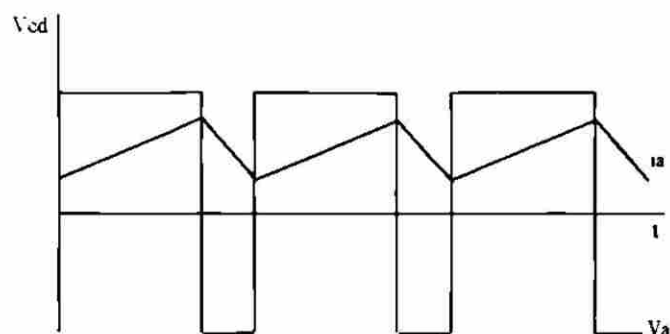
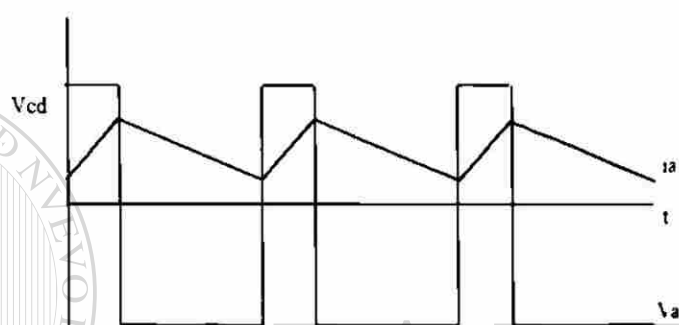


Figura 143 Circuito básico de 4 cuadrantes





MOTOR HACIA ADELANTE



FRENADO EN REVERSA

Figura 144 forma de onda del voltaje para un circuito de 4 cuadrantes

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

11.28 Algunos Drives Utilizados En La Industria Marca **Saftronics****Modelo DG2 (UNIDIRECCIONAL)**

- Capacidades 1 Y 2 HP, EN 120 VCA / 240 VCA, 3 Y 5 HP, EN 240 VCA
- Doble alimentación de voltaje: 120 240 VCA
- Doble suministro de voltaje: 50 / 100 VCD
- Con los siguientes botones de control
  - \* Jog
  - \* Arranque / Paro
  - \* Potenciómetro para variar la velocidad.
  - \* Led indicador de operación.

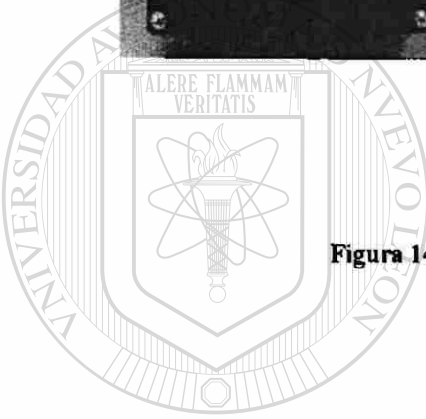




#### Modelo DF8 (BIDIRECCIONAL)

- Capacidades 1 Y 2 HP, EN 120 VCA / 240 VCA, 3 Y 5 HP, EN 240 VCA
- Doble alimentación de voltaje: 120 / 240 VCA.
- Doble suministro de voltaje: 50 / 100 VCD.
- Con los siguientes botones de control:
  - \* Jog
  - \* Arranque / Paro.
  - \* Potenciómetro para variar la velocidad.
  - \* Led indicador de operación
  - \* Hacia adelante / Reversa.

Figura 145 Drives de mercado para motores de corriente continua



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es por demás conocido que con la revolución de la tecnología en cuanto a nuevos equipos electrónicos para el control de velocidad de los motores eléctricos es necesario contar con ingenieros que conozcan tanto de motores eléctricos como de la electrónica asociada a los controles de velocidad, es por eso que este trabajo trata de dar un panorama general al ingeniero en electrónica de los principios básicos de las máquinas eléctricas, así como de la aplicación de estas en la industria, también algo que es poco tratado en los libros que tratan de máquinas eléctricas son las nuevas tecnologías en cuanto a la construcción de motores, tecnologías que ya se están aplicando en la industria de la localidad como son por ejemplo los motores de corriente directa sin escobillas.

En cuanto a las recomendaciones que hago, recuerden que la tecnología cambia minuto a minuto estoy casi seguro que vendrán mejoras en cuanto a la construcción de núcleos de transformadores, motores de alta eficiencia y el mejoramiento de los controles de velocidad de motores es por eso que exhorto al lector para que esta obra sirva como una referencia o un buen principio para cualquier trabajo de investigación que desee realizar.

Por último aclaro que muchos de los temas que se tocan en esta tesis son vistos sin el suficiente soporte matemático que ameritan pero, se pueden profundizar en cada uno de los temas ayudados con la bibliografía que se recomienda.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## BIBLIOGRAFIA

Boylestad Robert / Nashelsky Louis

Electrónica Teoría de Circuitos

Editorial Prentice Hall

1987

Chapman Sthepen J.

Maquinas Eléctricas

Editorial Mc. Graw Hill

1991

Chauprades.R.

Control Electrónico de Motores de C.D.

Colección Electrónica Informática.

Editorial GG.

1994

Gourishankar Vembu

Conversión de Energía Electromagnética

Representaciones y Servicios de Ingeniería S A.

1975.

Gwyther H.F.G.

Potencia Eléctrica y Electrónica de Potencia

Editorial Alfa Omega

1993

Kaufman Milton / Seidman Arthur H.

Electrónica Moderna para Ingenieros y Técnicos

Editorial Mc Graw Hill 2ª Edición

1992

Kosow Irving I.

Maquinas Eléctricas y Transformadores.

Editorial Reverte S.A.

1992

Liwschitz / Garik, Michael

Máquinas de Corriente Alterna,

Editorial Continental S.A. de C.V.

1984.

McPherson George

Introducción a las Maquinas Electricas y Transformadores

Editorial Limusa

1987

Mileaf Harry

Electricidad

Editorial Limusa

1982

Nasar I. Bolden.

Máquinas Eléctricas.

Dinámica y Control S A.

Editorial CECSA.

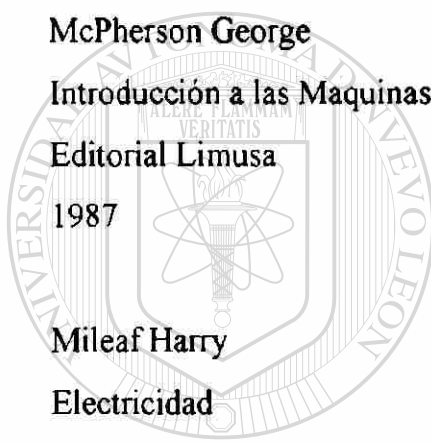
1993

Ney J.

Lecciones de Corriente Alterna

Editorial Marcombo

1977



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Pérez Amador Victor  
 Pruebas de Equipo Electrico 2  
 Motores Trifasicos de Inducción  
 Editorial Limusa  
 1983

Sedra Adel / Smith Kenneth.  
 Dispositivos Electrónicos y Amplificadores de Señal  
 Editorial Interamericana  
 1985



Stanley Wolf  
 Guía para Mediciones Eléctricas y Practicas de Laboratorio  
 Editorial Prentice Hall  
 1986

Vázquez Ramírez José/ Domingo Amadeo

Pilas y Acumuladores De Máquinas de Corriente Continua  
 Ediciones CEAC

1995 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

INTERNET.

<http://www.glentenk.com/profile2.htm>  
<http://www.osvel.home.ml.org>  
<http://www.weg.com.br/espanhol/wau/3.htm>  
<http://www.weg.com.br/espanhol/wmu/wegm.htm>  
<http://www.slip.net/~horizon/motorp/brushless.htm>  
<http://aveox.com/articles.html>  
<http://aveox.com/primer.html>  
<http://www.mcg-net.com/Brshless.htm>  
<http://www.ametektmd.com/controller/140019-o.htm>  
<http://www.qmctech.com/products.htm>  
<http://www.katech.com>  
<http://www.katech.com/4pager.htm>  
<http://www.mfmrtech.com/>  
 [URL: [www.usal.es/~ques/DOC/CMIQ/12](http://www.usal.es/~ques/DOC/CMIQ/12)]

## LISTA DE TABLAS

<b>No. De Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
<b>CAPITULO 3 CIRCUITOS MAGNETICOS</b>		
Tabla 1	Tabla de conversión de unidades magnéticas	22
<b>CAPITULO 4 TRANSFORMADORES</b>		
Tabla 2	Valores de niveles de ruido en Transformadores	37
Tabla 3	Porcentajes de carga en un Transformador dependiendo de la relación de $Z_1$ en $Z_2$	40
Tabla 4	Tiempos de sobrecargas permitidos en los Transformadores	40
Tabla 5	Dimensiones físicas de Transformadores comerciales	50
Tabla 6	Programa recomendado para pruebas de Mantenimiento en Transformadores	54
Tabla 7	Limites de prueba para aceites tipo vegetal en Transformadores	54
<b>CAPITULO 5 MOTORES DE INDUCCION MONOFASICOS</b>		
Tabla 8	Relaciones de potencia contra el capacitor usado en un motor de inducción con capacitor de arranque	62
<b>CAPITULO 6 MOTORES DE INDUCCION TRIFASICOS</b>		
Tabla 9	Deslizamiento del rotor en función de la velocidad del motor	73
<b>CAPITULO 7 MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA</b>		
Tabla 10	Rendimiento de los motores compound de 230 volts	105
<b>CAPITULO 8 MAQUINAS SINCRONICAS</b>		
Tabla 11	Limite económico para la corrección del factor de potencia	119

## LISTA DE FIGURAS

No. De Figura	Descripción	Pagina
<b>CAPITULO 3 CIRCUITOS MAGNETICOS</b>		
Fig. 1	Imanes permanentes	15
Fig. 2	Campo Magnético rodeando a un conductor con corriente	17
Fig. 3	Regla de la mano derecha para conductores	18
Fig. 4	Regla de la mano derecha para Bobinas	18
Fig. 5	Limaduras de Hierro sobre una hoja de papel que cubre a una barra magnética	19
Fig. 6	Líneas de flujo en un imán	20
Fig. 7	Ilustración de un Gauss	20
Fig. 8	Comparación entre un circuito eléctrico y uno magnético	22
Fig. 9	Curvas de Imanación	25
Fig. 10	Curvas de imanación para diferentes frecuencias	26
Fig. 11	Lazo de Histeresis	29
Fig. 12	Lazos típicos de Histeresis	30
Fig. 13	Perdidas en los Materiales	30
Fig. 14	Núcleos laminados	31
Fig. 15	Núcleos de polvo de Hierro	31
<b>CAPITULO 4 TRANSFORMADORES</b>		
Fig. 16	Esquema de la relaciones de Energía en una Máquina Eléctrica	33
Fig. 17	Conexión básica de un Transformador	34
Fig. 18	Desplazamientos angulares entre los devanados de un Transformador	37
Fig. 19	Terminales de “Alta” y de “Baja” en un Transformador	38
Fig. 20	Relación de Transformación	38
Fig. 21	Terminales indicando la polaridad de un Transformador	41
Fig. 22	Prueba de polaridad de un Transformador	41
Fig. 23	Conexiones serie-paralelo de un transformador	42
Fig. 24	Modelo de parámetros del transformador “Baja como primario”	42
Fig. 25	Modelo de parámetros del transformador “Alta como primario”	42
Fig. 26	Reflexión de impedancias en el Transformador	43
Fig. 27	Forma de onda del voltaje trifásico	44
Fig. 28	Conexiones Delta-Estrella en un Transformador	45
Fig. 29	Conexiones de 3 Transformadores monofásicos para formar un trifásico	45
Fig. 30	Transformador de distribución comercial “Delta-Abierto”	46
Fig. 31	Transformador tipo poste	51
Fig. 32	Transformador tipo estación	52
Fig. 33	Transformador tipo pedestal	52
Fig. 34	Transformador de potencia	53
Fig. 35	Transformador para control y alumbrado	53
Fig. 36	Transformador comercial tipo poste monofásico de 25 KVA	54
Fig. 37	Diagrama esquemático del Transformador tipo poste monofásico de 25 Kva 440/220 Volts	55



Fig. 38	Transformador comercial tipo poste monofasico de 10 KVA	55
Fig. 39	Diagrama esquemático del Transformador tipo poste monofasico de 25 Kva 13200/440-220 Volts	56
Fig. 40	Transformador comercial tipo poste monofasico de 15 KVA 13200YT/7620-120/240 clase 15Kv	56
Fig. 41	Diagrama esquemático del Transformador tipo poste monofasico de 15 KVA 13200YT/7620-120/240 clase 15Kv	57

### CAPITULO 5 MOTORES DE INDUCCION MONOFASICOS

Fig. 42	Partes principales del motor de inducción monofasico	58
Fig. 43	Fotografía del motor de inducción con y sin capacitor de arranque	59
Fig. 44	Diagrama Electrico de un motor de inducción de fase partida	60
Fig. 45	Curva par-velocidad de un motor de inducción de fase partida	61
Fig. 46	Diagrama eléctrico, curva par-velocidad y fotografía de un motor de inducción con capacitor de arranque	62
Fig. 47	Diagrama electrico y curva par-velocidad, de un motor de inducción con capacitor permanente	63
Fig. 48	Diagrama electrico y curva par-velocidad, de un motor de inducción con capacitor de arranque y capacitor permanente	63
Fig. 49	Diagrama esquemático y curva par-velocidad, de un motor de inducción de polos sombreados	64

### CAPITULO 6 MOTORES DE INDUCCION TRIFASICOS

Fig. 50	Estator y rotor de un motor de inducción trifasico	67
Fig. 51	Sistema de voltaje trifasico producido por C.F.E. , devanado de motor trifasico y el campo magnético Bnet producido por los conductores	68
Fig. 52	Dirección de rotación del campo magnético Bnet para secuencia de fase ABC y ACB	69
Fig. 53	Modelo del motor como transformador giratorio	71
Fig. 54	Curva comparativa B-H entre un motor y un transformador	72
Fig. 55	Modelo de parámetros del rotor	74
Fig. 56	Modelo equivalente de parámetros de un motor de inducción trifasico	74
Fig. 57	Diagrama de potencias en un motor de inducción	76
Fig. 58	Campo magnético del rotor y campo magnético del estator en función de la velocidad	78
Fig. 59	Curva característica par-velocidad de un motor de inducción trifasico	78
Fig. 60	Conexión de un motor de 3 terminales	79
Fig. 61	Devanado de un motor de 6 terminales	80
Fig. 62	Conexiones en la caja de terminales de un motor de 6 puntas	80
Fig. 63	Conexión de un motor de 9 terminales	81
Fig. 64	Conexiones en la caja de terminales de un motor de 9 puntas	81
Fig. 65	Tipos de devanados trifasicos	82
Fig. 66	Devanado trifasico imbricado doble capa, 4 polos y 12 ranuras	84
Fig. 67	Diagrama esquemático de un motor de 4 polos	84
Fig. 68	Curvas características par-velocidad para motores con rotores de diferentes diseños	85

### CAPITULO 7 MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Fig.69	Motor de c.c. con su cable de acero utilizado en ascensores	88
Fig.70	Partes de la maquina de c.c.	88
Fig.71	Construcción de un conmutador	89
Fig.72	Maquina excitada por separado y shunt autoexcitada	91
Fig.73	Diagramas eléctricos de los motores serie, shunt y compound	91
Fig.74	Diagrama esquemático de un generador shunt	92
Fig.75	Característica de carga de un generador shunt	93
Fig.76	Característica de carga de un generador serie	94
Fig.77	Diagrama esquemático de un generador compound	94
Fig.78	Característica de carga de un generador compound	95
Fig.79	Diagrama de conexiones de un motor shunt	96
Fig.80	Diagrama de conexiones de un motor serie	97
Fig.81	Diagrama de conexiones de un motor compound diferencial	98
Fig.82	Curva de velocidad de motores	101
Fig.83	Freno prony	104
Fig.84	Devanado de armadura	106
Fig.85	Devanado imbricado	106
Fig.86	Formas de los devanados de armadura	107

### CAPITULO 8 MAQUINAS SINCRONICAS

Fig.87	Polo de una dinamo sincrónica	109
Fig.88	Efecto de carga sobre la obstrucción del flujo	111
Fig.89	Campo rotatorio del estator con respecto al rotor	112
Fig.90	Devanado amortiguador de jaula de ardilla	113
Fig.91	Conexión de resistencias para el arranque de un motor sincrónico	115
Fig.92	Curvas "v" del motor sincrónico	115
Fig.93	Familia de curvas de factor de potencia contra la corriente de campo	116
Fig.94	Conexiones del circuito de laboratorio para obtener las curvas "v"	117
Fig.95	Diagrama a bloques de un motor sincrónico sin escobillas	121

### CAPITULO 9 MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA SIN ESCOBILLAS

Fig.96	Conmutación electrónica en motores de c.c. sin escobillas	124
Fig.97	Drives y motores de c.c. sin escobillas	126

### CAPITULO 10 MOTORES DE PASO

Fig.98	Partes de un motor de pasos	130
Fig.99	Motor a pasos elemental	131
Fig.100	Diagrama básico de conexión del transductor	133
Fig.101	Diagrama básico de los devanados de un motor de reluctancia variable	136
Fig.102	Motor de pasos con magneto permanente	136
Fig.103	Circuito de drivers de un motor de pasos unipolar	137
Fig.104	Diagrama de un motor de pasos unipolar	138
Fig.105	Secuencia del driver para dos fases por pasos y para la mitad de pasos	138
Fig.106	Diagrama básico de los devanados de un motor de pasos bipolar	139
Fig.107	Circuito típico de puente "H"	140
Fig.108	Diagrama esquemático del circuito integrado CD4017	141
Fig.109	Circuito electrónico transductor para motores de pasos	142

Fig.110	Circuito electrónico bidireccional para motores de paso	143
---------	---	-----

### CAPITULO 11 CONTROL ELECTRONICO DE MOTORES

Fig.111	Esquema de regulación convergente	146
Fig.112	Esquema de regulación en cascada	147
Fig.113	Esquema de regulación paralela	147
Fig.114	Comparación entre los métodos de modulación PAM y PWM	151
Fig.115	Diagrama de un inversor de frecuencia	152
Fig.116	Modelo de transistores de 6 pulsos para un motor trifasico	152
Fig.117	Relación de Volts/Hertz en un inversor	154
Fig.118	Forma de onda de la señal PWM	154
Fig.119	Aplicaciones de velocidad variable	156
Fig.120	Diagrama de conexiones de un inversor de mercado	158
Fig.121	Fotografía del drive modelo minimotor	159
Fig.122	Diagrama esquemático de un encoder óptico	161
Fig.123	Diagrama de un sensor de reluctancia variable	162
Fig.124	Diagrama de un sensor magneto-resistivo	162
Fig.125	Diagrama a bloques de un drive de c.d.	163
Fig.126	Sistema de control d lazo abierto	164
Fig.127	Amplificador de error	165
Fig.128	Sistema de control de lazo cerrado	165
Fig.129	Sistema de control de lazo cerrado con opamp	166
Fig.130	Circuito equivalente del motor de c.d.	167
Fig.131	Sistema de regulación de velocidad del 3%	168
Fig.132	Regulador de velocidad usando tacogenerador	168
Fig.133	Regulador de velocidad modificado con tacogenerador	169
Fig.134	Diagrama a bloques para un regulador de corriente	170
Fig.135	Regulador de velocidad con limitador de corriente	170
Fig.136	Angulo de disparo y de conducción de un tiristor	171
Fig.137	Esquema de control bidireccional regenerativo	172
Fig.138	Cuadrantes de trabajo de un drive de corriente directa	172
Fig.139	Esquema de tiristores en un drive de c.d. regenerativo	173
Fig.140	Circuito básico de un solo cuadrante y formas de onda del voltaje	175
Fig.141	Circuito básico de dos cuadrantes	176
Fig.142	Forma de onda del voltaje para un circuito de dos cuadrantes	177
Fig.143	Circuito básico de cuatro cuadrantes	177
Fig.144	Forma de onda del voltaje para un circuito de cuatro cuadrantes	178
Fig.145	Fotografías de drives de mercado para motores de corriente continua	179

## APENDICE

### TABLA DE CONSTANTES Y FACTORES DE CONVERSION

---

#### Constantes

---

Carga del electrón	$e^- -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Permeabilidad del Espacio libre	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$
Permitividad del Espacio libre	$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

---



---

#### Factores de Conversión

---

Longitud	1 metro (m)	=3.281 pies =39.37 pulgadas
Masa	1 Kilogramo (Kg.)	=0.0685 slug =2.205 libras masa
Fuerza	1 Newton (N)	=0.2248 libras fuerza =7.233 poundsals =0.102 Kg. fuerza
Par	1 Newton-metro (n-m)	=0.738 (lb-pie)
Energía	1 Joule (j)	=0.738 (pie-lb) =3.725 x 10 <sup>-7</sup> (Hp-hora) =2.778 x 10 <sup>-7</sup> (KWh)
Potencia	1 Watt	=1.341 x 10 <sup>-3</sup> Hp
	1 HP	=0.7376 pie. Lbf/s =746 watt
Flujo magnético	1 Weber (Wb)	=108 Maxwell
Densidad de flujo magnético	1 Weber/m <sup>2</sup>	=10000 Gauss =64.5 Kilolneas/pulg <sup>2</sup>
Intensidad de campo magnético	1 Amper-vuelta/m	=0.0254 <sup>a</sup> -vuelta/pulg =0.0126 Oesterd

---

## GLOSARIO

**Acondicionamiento de señal** Es un dispositivo electrónico que cambia los valores de voltaje y corriente originales y los adapta a nuevos valores proporcionales a los primeros.

**Asincrónico** Se refiere a los motores que se muevan a una velocidad inferior a la del campo magnético giratorio.

**Autoexcitado** Se refiere a máquinas que no requieren de fuente externa de c.c.

**c.c.** Corriente continua ( que puede ser del tipo pulsante)

**c.d.** Corriente directa (totalmente filtrada o alisada)

**Compound** Combinación de bobinas serie y paralelo con la bobina de armadura.

**Datos de placa** Son los valores máximos permisibles en los equipos eléctricos o electrónicos.

**Devanado compensador** Devanado similar a un jaula de ardilla usado en los motores sincrónicos para el arranque de los mismos.

**Devanado imbricado** Devanado usado para tener más capacidad de corriente que de voltaje.

**Devanado Ondulado** Devanado que tiene más capacidad de voltaje que de corriente.

**Diagrama esquemático** Es un diagrama que muestra la forma de conectar un dispositivo Eléctrico.

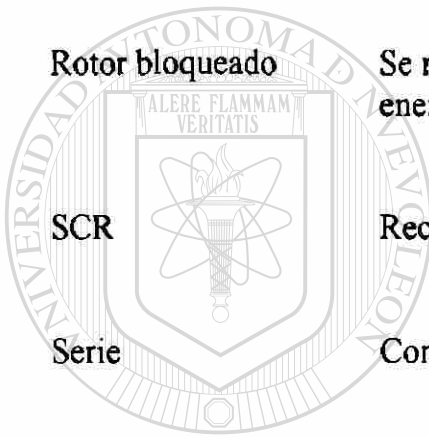
**Driver** Término empleado para describir generalmente a un circuito electrónico que controla la velocidad de un motor.

Eficiencia	Es la relación de la potencia de salida a la potencia de entrada en un circuito eléctrico o electrónico
Estado sólido	Así se le llama a los elementos electrónicos contruidos con silicio y germanio.
Fototransistor	Es un transistor que es accionada su base mediante un rayo de luz.
Frecuencia	Rapidez de cambio de la señal de C.A. en América es de 60 Hertz
Freno prony	Prueba que se realiza en los motores eléctricos para determinar su capacidad de par y potencia.
Hertz (Hz)	Unidad de medida de la frecuencia eléctrica.
IGBT	Transistor bipolar de compuerta asilada.
Inversor de frecuencia	Dispositivo electrónico que cambia el valor de la frecuencia del voltaje ( se usa para el control de velocidad de motores de c.a.)

---

KVA	Kilo Volt Amper es la unidad de medida de la potencia aparente y se utiliza para denotar la potencia en un transformador.
MOSFET	Transistor de efecto de campo de metal oxido semiconductor.
Opamp	Amplificador operacional ( circuito integrado)
PAM	Modo de trabajo de un inversor por modulación de amplitud del pulso (Pulse Amplitude Modulation)
PWM	Modo de trabajo de un tiristor por modulación del ancho del pulso (Pulse Width Modulation)

Ranura	Lugar en el rotor o estator de una máquina eléctrica en donde se encuentran alojadas las bobinas.
Rectificador de c.a/c.d	Es un dispositivo electrónico formado por tiristores para convertir la señal de c.a. en c.d.
Regulador de velocidad	Es un dispositivo eléctrico, electrónico o mecánico cuya función es controlar la velocidad de un motor independientemente de la carga.
Rendimiento	Término similar al de Eficiencia pero el rendimiento se usa en motores.
Rotor bloqueado	Se refiere a cuando el rotor de un motor esta frenado y el motor energizado.
SCR	Rectificador controlado de silicio.
Serie	Conexión de la bobina de campo en serie con la armadura.
Shunt	Conexión de la bobina de campo en paralelo con la armadura.
Sincrónica	Se refiere a los motores que se mueven a la misma velocidad que el campo magnético giratorio.
Tensión	Es sinónimo de voltaje.
Transductor	Dispositivo que sirve para el acondicionamiento de señal.
Vacío	Generalmente se refiere a las máquinas eléctricas cuando están sin carga



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

- Nombre:** Jesús Guadalupe Castañeda Marroquín
- Nombre de los padres:** Jesús Castañeda Moreno  
María Isabel Marroquín Salazar
- Lugar y fecha de nacimiento:** Monterrey, Nuevo León.  
11 de Octubre de 1968
- Grado de escolaridad:** Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Asociaciones:** Miembro de la Sociedad de Ingenieros y Técnicos de Monterrey A.C.
- Docencia:** Maestro de planta en el Area de Potencia Eléctrica  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Universidad Autónoma de Nuevo León  
1989 a la fecha.
- Laboral:** Centro de Diseño y Mantenimiento de Instrumentos  
Universidad Autónoma de Nuevo León  
Jefe del Departamento de Equipo Didáctico y Científico  
De 1989 a 1993
- Centro de Capacitación para el Trabajo Industrial No. 92  
SEP-SEIT  
Jefe del Area de Capacitación  
1995 a la fecha.
- Cervecería Cuauhtemoc -Moctezuma S.A.  
Asesor en el Area de Electrónica e Instrumentación  
1994 a la fecha
- Grado que desea obtener:** Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con  
Especialidad en Electrónica
- Nombre de la tesis:** Estudio de las Máquinas Eléctricas para el Ingeniero en  
Electrónica



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





