

---

**Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**



**Facultad de Ingeniería Eléctrica**



***“CARACTERÍSTICAS EXPERIMENTALES DE OPERACIÓN  
DE UNA MÁQUINA DE INDUCCION TRIFÁSICA”***

**TESIS**

**Que para obtener el Título de  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**Presenta**

**NOÉ PARDO PANIAGUA**

**Asesor**

**ING. GUSTAVO SAUCEDO ZAVALA**

**MORELIA, MICHOACAN, SEPTIEMBRE DE 2011**

---

# **Agradecimientos**

A dios por darme la vida.

A mi asesor Ing. Gustavo Saucedo Zavala, por su apoyo incondicional e incansable paciencia.

A los maestros, compañeros de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, a los Efrén Capiz y a los del Club de ajedrez (Caballeros Negros) por su apoyo, amistad y experiencias, gracias.

A mi familia Ma. Agustina, Rafael, Yasmin, Yadira y Samuel, por su apoyo y paciencia, este logro no seria posible.

A Rosita, mi razón de vivir.

A David y Otoniel por estar en los momentos más difíciles de mi etapa estudiantil.

## **Dedicatoria**

A mis abuelos paternos Lucio Pardo y Serapia Cruz

A mis abuelos maternos Andrés Paniagua † y Elvira Quintana †

A mis padres Rafael Pardo y Ma. Agustina Paniagua

A Rosa Elvia López

# Resumen

En el Mundo, el uso de máquinas de inducción es del 80 de cada 100, debido a su simplicidad de construcción y costo. Donde la presente tesis, viene a fortalecer los conocimientos teóricos-prácticos, más relevantes sobre la máquina de inducción, el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Eléctrica (LaFIE), de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Con el cambio de plan de estudios de anual a semestral, las materias en el caso de las máquinas Eléctricas se ven de forma superficial, por la amplitud del conocimiento a adquirir, es necesaria la ayuda documental, reciente, resumida y concreta, donde existe un documental sobre la máquina síncrona, próximamente sobre la máquina de inducción y próximamente sobre la máquina de CD, ya que son las tres máquinas más usadas en la actualidad.

Se presenta el modelo del circuito equivalente y conexiones a realizar, facilitando el manejo y comprensión del lector, dichas máquinas y equipos utilizados, fueron usados para levantar la información recabada en la presente tesis, desde finales del 2010. En el LaFIE de la UMSNH, obteniendo resultados satisfactorios, que ayudaran a ahorrar tiempo y esfuerzo, así como fortalecer la formación de los futuros Ingenieros electricistas.

# Contenido

	Páginas
Agradecimientos-----	II
Dedicatoria -----	III
Resumen -----	IV
Contenido -----	V
Lista de Figuras -----	IX
Lista de Tablas -----	XII
Lista de Símbolos y Abreviaturas -----	XIII
Capítulo 1 Introducción	
1.1 Antecedentes -----	1
1.2 Objetivo general -----	2
1.3 Justificación -----	3
1.4 Metodología -----	4
1.5 Descripción del problema -----	4
1.6 Descripción de capítulos -----	5
Capítulo 2 Principios de conversión de energía electromecánica	
2.1 Introducción -----	6
2.2 Leyes y formulaciones de la conversión de energía electromecánica -----	6
2.3 Fuerzas y pares de los sistemas de campos magnéticos -----	9
2.4 Energía balanceada -----	11
2.5 Energía en sistemas de campo magnético de excitación única -----	12
2.6 Determinación de fuerzas magnéticas y pares a partir de la energía y Coenergía -----	14

2.7 Pérdidas de energía en los núcleos ferromagnéticos -----	15
2.7.1 Pérdida por histéresis -----	15
2.7.2 Pérdida por corrientes parásitas -----	16
2.8 Conclusiones -----	17
Capítulo 3 Conceptos básicos de las máquinas rotatorias	
3.1 Introducción -----	18
3.2 Conceptos elementales -----	18
3.3 Introducción a la máquina de inducción -----	19
3.4 Bobinas Ortogonales -----	20
3.5 Múltiples pares de polos -----	20
3.6 La máquina generalizada -----	22
3.6.1 La matriz de resistencias -----	23
3.6.2 La matriz de inductancias -----	23
3.6.3 Matriz de par -----	25
3.7 La máquina trifásica -----	25
3.8 Concepto de deslizamiento -----	27
3.9 Conclusiones -----	28
Capítulo 4 Máquina polifásica de inducción	
4.1 Introducción -----	29
4.2 Construcción de las máquinas polifásicas de inducción -----	29
4.2.1 Representación del circuito del rotor -----	30
4.2.2 Representación del circuito del estator -----	33
Campo magnético rotatorio del estator -----	33
Características constructivas del estator -----	35
4.3 Deslizamiento -----	38

4.4	Análisis del circuito equivalente -----	39
4.4.1	Punto de operación -----	42
4.5	Determinación de parámetros de la máquina de inducción -----	43
4.5.1	Prueba de vacío -----	43
4.5.2	Prueba de rotor bloqueado -----	45
4.6	Pérdidas y diagramas de flujo de potencia -----	46
4.7	Acción generatriz de inducción -----	47
4.7.1	Circuito equivalente del generador de inducción -----	47
4.7.2	Circuito equivalente del generador de inducción autoexcitado ---	48
4.7.3	Motor de inducción como generador -----	50
	Ventajas y desventajas del generador de inducción -----	50
4.8	Conclusiones -----	52
Capítulo 5 Pruebas de laboratorio realizadas a la máquina de inducción		
5.1	Introducción -----	54
5.2	Obtención del circuito equivalente -----	55
5.2.1	Prueba en vacío -----	55
5.2.2	Prueba de rotor bloqueado -----	57
5.3	Deslizamiento de la máquina de inducción -----	60
5.4	Operación del motor de inducción -----	61
5.4.1	Característica corriente-potencia útil -----	65
5.4.2	Característica corriente-velocidad -----	65
5.4.3	Característica $\cos \theta$ -potencia útil -----	66
5.4.4	Característica Par-velocidad -----	67
5.4.5	Característica velocidad-potencia útil -----	69

5.5 Operación del generador de inducción -----	70
5.5.1 Generador conectado al bus -----	70
Características corriente-velocidad -----	74
Característica velocidad-potencia útil -----	74
5.5.2 Generador autoexcitado o aislado -----	75
5.6 Conclusiones generales -----	80
5.6.1 Conclusiones particulares -- -----	80
 Capítulo 6 Conclusiones, observaciones y trabajos futuros	
6.1 Conclusiones generales -----	82
6.1.1 Conclusiones particulares -----	83
6.2 Observaciones para un buen levantamiento de información -----	84
6.3 Trabajos futuros -----	85
 Apéndice	
Apéndice A. Diseño de motores de inducción -----	87
Apéndice B. Aspectos sobresalientes de las clases de diseños -----	88
Referencias -----	90



# Lista de Figuras

	Páginas
Figura 1.1 Modelo de la máquina de inducción bifásica diseñada por Tesla ---	2
Figura 2.1 Relación de Faraday -----	7
Figura 2.2 Regla de la mano derecha de la fuerza de Lorentz -----	10
Figura 2.3 a) Esquema de un dispositivo de conversión electromecánica de campo magnético, b) Dispositivo de producción de fuerza simple -----	11
Figura 2.4 Diagrama esquemático de un relé electromagnético -----	13
Figura 2.5 Energía almacenada y coenergía -----	14
Figura 2.6 Anillo de histéresis -----	16
Figura 2.7 Corrientes parasitas o de eddy -----	17
Figura 3.1 Polo norte y polo sur de un cilindro -----	20
Figura 3.2 Cilindro con dos pares de polos -----	21
Figura 3.3 Definición de ángulos eléctricos y mecánicos -----	21
Figura 3.4 a) Máquina con igual número de pares de polos en el rotor y estator, b) Máquina con diferentes números de pares de polos en el rotor y estator -----	21
Figura 3.5 Partes de una máquina eléctrica rotativa -----	22
Figura 3.6 Esquema de la máquina generalizada -----	22
Figura 3.7 Corrientes y fuerzas magnetomotrices de la máquina trifásica -----	26
Figura 4.1 Rotor tipo jaula de ardilla, a) Cortocircuitados en sus extremos, b) En su	

apariciencia física -----	30
Figura 4.2 Rotor devanado -----	31
Figura 4.3 Circuitos equivalentes alternos a) y b) para el circuito del rotor de un motor polifásico de inducción con corriente del rotor invariable -----	32
Figura 4.4 Curva par-velocidad y regiones de operación de la máquina de inducción-----	32
Figura 4.5 Motor de inducción de un par de polos, para la fase “a” -----	33
Figura 4.6 Motor de inducción con dos pares de polos -----	34
Figura 4.7 Grados eléctricos y geométricos según los pares de polos -----	35
Figura 4.8 Estator con enrollado tipo imbricado -----	36
Figura 4.9 Circuito equivalente (primario) del estator de un motor polifásico de inducción -----	37
Figura 4.10 Diagrama a)Espacio-fasorial, b) tiempo fasorial de un MI -----	37
Figura 4.11 Forma alternativa de circuito equivalente -----	40
Figura 4.12 Prueba en vacío -----	43
Figura 4.13 Prueba de corto circuito -----	45
Figura 4.14 Circuito equivalente del generador de inducción -----	47
Figura 4.15 Circuito equivalente del generador de inducción autoexcitado -----	49
Figura 5.1 Conexión física en vacío de la máquina jaula de ardilla -----	55
Figura 5.2 Conexión física en vacío de la máquina de rotor devanado -----	56
Figura 5.3 Freno electromagnético, para la prueba de rotor bloqueado -----	57
Figura 5.4 Región de operación de la máquina de inducción -----	60
Figura 5.5 Principio de funcionamiento de la máquina de inducción -----	62
Figura 5.6 Conexión física de la MIJA -----	63

Figura 5.7 Conexión física de la MIRD -----	64
Figura 5.8 Gráfica corriente-potencia útil -----	65
Figura 5.9 Gráfica corriente-velocidad -----	66
Figura 5.10 Gráfica $\cos \theta$ -potencia útil -----	67
Figura 5.11 Gráfica Par-velocidad -----	68
Figura 5.12 Gráfica Par-velocidad con resistencias externas -----	69
Figura 5.13 Gráfica velocidad-potencia útil -----	70
Figura 5.14 Comparación de un generador de inducción y un generador síncrono -	70
Figura 5.15 Conexión física del generador jaula de ardilla -----	71
Figura 5.16 Conexión física del generador rotor devanado -----	72
Figura 5.17 Gráfica corriente-velocidad de un generador de inducción de ¼ Hp --	74
Figura 5.18 Gráfica velocidad-potencia de un generador de inducción de ¼ Hp --	75
Figura 5.19 Generador de inducción autoexcitado -----	76
Figura 5.20 Conexión física del generador aislado jaula de ardilla de ¼ Hp -----	76
Figura 5.21 Conexión física del generador aislado rotor devanado de ¼ Hp -----	77
Figura 5.22 Gráfica voltaje generado de una MIJA y de una MIRD de ¼ Hp -----	79
Figura 5.23 Gráfica frecuencia generada de una MIJA y de una MIRD de ¼ Hp -	79

# Lista de Tablas

	Páginas
Tabla 4.1 Tabla comparativa entre un generador de inducción y un generador síncrono -----	51
Tabla 4.2 Eficiencia para un motor de inducción trifásico tipo NEMA B.16 --	52
Tabla 5.1 Datos nominales de la máquina de inducción -----	55
Tabla 5.2 Valores obtenidos de las máquinas de inducción en vacío -----	56
Tabla 5.3 Valores 3Ø obtenidos de la máquina de inducción en rotor bloqueado -	58
Tabla 5.4 Reglas empíricas para separar las reactancias $X_1$ y $X_2$ -----	59
Tabla 5.5 Datos de la MIJA de ¼ Hp -----	63
Tabla 5.6 Datos de la MIRD de ¼ Hp -----	64
Tabla 5.7 Datos obtenidos del generador jaula de ardilla de ¼ Hp -----	71
Tabla 5.8 Datos obtenidos del generador rotor devanado -----	72
Tabla 5.9 Valores obtenidos del generador aislado jaula de ardilla de ¼ Hp -----	77
Tabla 5.10 Valores obtenidos del generador aislado rotor devanado de ¼ Hp ---	78

## Lista de Símbolos y Abreviaturas

$N$	Número de vueltas, numero de conductores	$[R]$	Matriz de resistencias ( $\Omega$ )
		$X$	Reactancia
$Np$	Numero de polos	$X_{cc}$	Reactancia de cortocircuito ( $\Omega$ )
$n_{ph}$	Numero de fases del estator	$X_2$	Reactancia del rotor ( $\Omega$ )
$e_{ind}$	Voltaje inducido (V)	$X_1$	Reactancia del estator ( $\Omega$ )
$V, e$	Voltaje (V)	$X_m$	Reactancia de magnetización ( $\Omega$ )
$V_{f-f}$	Voltaje de fase a fase (V)	$L$	Inductancia (H)
$V_{l, nl}$	Voltaje de línea a neutro (V)	$[L]$	Matriz de inductancias (H)
$E_{prom}$	Voltaje promedio (V)	$[L(\theta)]$	Inductancia en función del ángulo
$f_{fld}$	Variable de fuerza	$X$	Posición, desplazamiento
$W_{fld}$	Razón de cambio	$E$	Campo eléctrico
$Z$	Impedancia ( $\Omega$ )	$B$	Campo magnético
$Z_{cc}$	Impedancia de cortocircuito ( $\Omega$ )	$B_\alpha, B_\beta$	Componentes Ortogonales
$R_{ext}$	Resistencia externa ( $\Omega$ )	$B_{max}$	Densidad máxima de flujo
$R_{cc}$	Resistencia de cortocircuito ( $\Omega$ )	$I_{net}$	Corriente neto (A)
$R_2$	Resistencia del rotor ( $\Omega$ )	$I_{linea}, I_1, I_{l, nl}$	Corriente de alimentación (A)
$R_1$	Resistencia del estator ( $\Omega$ )		

$I_r, I_2$	Corriente del rotor (A)	$dt$	Diferencial con respecto al tiempo
$i_\mu$	Corriente de magnetización (A)	$dx$	Diferencial de cambio
$I_g$	Corriente del entrehierro	$d\lambda$	Diferencial estado variable
$I_{campo}$	Corriente de campo (A) (máquina de arrastre)	$dW_{electr}$	Diferencial de entrada de energía eléctrica
$K_e$	Constante de proporcionalidad	$dW_{mec}$	Diferencial de salida de energía mecánica
$C$	Capacitancia (farads)	$dW_{fld}$	Diferencial del cambio en la energía magnética acumulada
$W_\phi, W'_\phi$	Energía y Coenergía		
$d$	Espesor	rpm	Revoluciones por minuto
$Wb$	Weber	fmm, f.e.m	Fuerza magnetomotriz
$\frac{d\phi}{dt}$	Derivada con respecto al flujo	$F_e$	Fuerza magnetomotriz en el estator
$\frac{d\theta}{dt}, \omega_m$	Velocidad angular (rad/s)	$f$	Frecuencia (Hz)
$n_r$	Velocidad del rotor (rad/s)	$f_e$	Frecuencia suministrada (Hz)
$H$	Campo magnético, Henrios	$f_r$	Frecuencia del rotor (Hz)
$H_n, -H_{nr}$	<i>Magnitud espacio-fase</i>	vs	Contra
$s$	Deslizamiento	$t$	Tiempo (s)
$dl$	Diferencial de integración	$P$	Potencia real (W)
		$P_{motor}$	Potencia del motor (W)

$P_{entr}, P_{nl}$	Potencia de entrada (W)	$i$	Corriente (A)
$P_{sal}, P_{flecha}$	Potencia de salida (W)	$i_{max}$	Corriente máxima (A)
$P_g$	Potencia Promedio (W)	$i_F$	Corriente de fase (A)
$P_{entrehierro}$	Potencia en el entrehierro (W)	$[i]$	Variable de estado (A)
$P_{núcleo}$	Patencia en el núcleo (W)	A	Ampere
S	Potencia aparente (VA)	a	Relación de transformación
Q	Potencia reactiva (VAR)	Hz	Frecuencia
fp	Factor de potencia	F	Fuerza
p	Polos	q	Carga
$P_e$	Pérdidas en el entrehierro (W)	H	Hilos
$P_{mec}$	Pérdidas mecánicas (W)	Hp	Caballos de fuerza
$P_{rotor}$	Pérdidas del rotor (W)	Sinc	Sincronismo
$P_f$	Pérdidas por fricción (W)	CD	Corriente directa
$R_c$	Pérdidas en el núcleo ( $\Omega$ )	CA	Corriente alterna
$T_m, T_{mec}$	Par mecánico (Nm)	V	Velocidad partícula
$T_{ac}$	Par acelerante (Nm)	P	Densidad de carga
$T_r$	Par resistente (Nm)	J	Densidad de corriente/Inercia
$[\tau (\theta)]$	Matriz de par (Nm)	W	Watt
V	Volt	3Ø	Trifásico

MIJA Máquina de Inducción  
Jaula de Ardilla

$\kappa$  Kilo ( $10^3$ )

### Subíndices

MIRD Máquina de Inducción  
Rotor Devanado

Ind Inducido

Prom, g Promedio

### Símbolos Griegos

$\alpha, \beta$  Inductancias mutuas

*fld* Cambio

$\phi$  Flujo

ext Externa

$\delta$  Espesor de laminación

Net Neto

$\Omega$  Ohm

electr Eléctrico

$\tau$  Par

mec, m Mecánico

$\theta$  Angulo tetta

máx Máximo

$\theta_{mec}$  Radianes mecánicos

entr Entrada

$\theta_{electr}$  Radianes eléctricos

sal Salida

$\omega$  Velocidad

e Entrehierro, estator,  
síncrona

$\omega_e, \omega_s$  Velocidad síncrona

r, rot Rotor

$\pi$  Pi (Líneas de Fuerza)

Rot-Bloq Rotor Bloqueado

$\lambda$  Densidad de flujo

*a, b, c* Fases

$\rho$  Coeficiente de fricción

s Síncrona

$\Phi$  Flujo radial

1, P Primario

$\eta$  Eficiencia

2, S Secundario

$\mu$  Micro ( $10^{-6}$ )

L Línea



# Capítulo 1

## Introducción

En este capítulo se presentan los antecedentes de la máquina de inducción polifásica. Además, se describe el objetivo general, justificación y metodología de esta tesis. Finalmente, se presenta una breve descripción de los capítulos que integran esta tesis.

### 1.1 Antecedentes.

El estudio y diseño de las máquinas eléctricas se encuentra entre las áreas más antiguas de la ingeniería eléctrica, dicho estudio comienza a finales del siglo XIX. Su invención se debe a Tesla y nace como una solución al problema de utilizar corriente alterna, cuyos niveles de tensión pueden ser variados mediante transformadores, sobre la corriente continua cuya dificultades de transmisión para la época ya comenzaban a ser evidentes. La defensa de la corriente continua era realizada por Edison, famoso inventor norteamericano que contaba con un inmenso prestigio. Sin embargo, la visión comercial de George Whestinghouse impulsa las ideas de Tesla para la construcción de la primera gran central hidroeléctrica que se construye en las Cataratas del Niágara, donde transmite mediante líneas de alta tensión y la reducen para alimentar a los motores de inducción que accionan la creciente carga industrial. Desde ese crucial momento y hasta la actualidad, la máquina de inducción ha ido acaparando la inmensa mayoría de aplicaciones en la industria, en el comercio y en el hogar, la Figura 1.1 muestra un modelo de la máquina diseñada por Tesla [Aller, 2007]. En ese entonces las unidades comenzaron a estandarizarse internacionalmente y llegaron a ser utilizadas por todos los ingenieros del mundo. Las unidades adoptadas fueron el Volt, ampere, ohm, watt y unidades similares, el sistema métrico de unidades ha sido utilizada para describir las cantidades eléctricas en las máquinas.

En 1954 fue adoptado como norma internacional un sistema de unidades del sistema métrico, denominado como Sistema Internacional (SI), también existen otros sistemas métricos como es el caso del sistema inglés aunque el único país que lo sigue manteniendo es Estados Unidos, donde en un futuro llegara a incorporarse, pero debido a que mucha gente ha crecido utilizando las unidades del sistema inglés, este permanecerá en uso durante un buen tiempo [Chapman, 2005].



Figura 1.1 Modelo de la máquina de inducción bifásica diseñada por Tesla.

## 1.2 Objetivo general

El objetivo general consiste en ofrecer los fundamentos teórico-prácticos necesarios para comprender los principios, analizar y evaluar las diferentes condiciones de operación de la máquina de inducción.

Los objetivos específicos de la presente tesis son:

- ◆ Ampliar el panorama de cómo opera una máquina de inducción, como motor y como generador.
- ◆ Crear una nueva fuente de consulta actualizada referente a la máquina de inducción polifásica.
- ◆ Obtener datos experimentales reales de la máquina de inducción de rotor devanado (MIRD) y de jaula de ardilla (MIJA) de  $\frac{1}{4}hp$  que son los

equipos con que dispone el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Eléctrica (LaFIE).

- ◆ Apoyar a los estudiantes de la FIE, a familiarizarse con las máquinas eléctricas y equipo con que dispone el LaFIE.

### **1.3 Justificación.**

Como alumno de la FIE, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Los planes de estudio de cada materia en el caso particular de la materia de máquinas eléctricas es muy ambicioso, de tal forma que en uno o dos semestres no se alcanza a ver con detalle. Esta tesis viene a fortalecer o ampliar la visión con respecto a la operatividad de dicha máquina. Cabe mencionar que esta tesis va orientada a alumnos, maestros o personas que estén interesadas en la operación de la máquina de inducción, así como en ampliar su conocimiento con respecto a esta máquina, ya que la máquina de inducción es la más utilizada.

Es muy importante comentar que la energía eléctrica suministrada por los generadores, es una fuente de energía limpia y eficiente, fácil de controlar y transmitir a larga distancia, donde un motor eléctrico no requiere ventilación ni combustibles constantes, a diferencia de los motores de combustión interna. Además, la energía calorífica o la energía mecánica pueden ser convertidas en energía eléctrica en sitios lejanos y esta puede ser transmitida a largas distancias hasta cualquier hogar, oficina o fábrica donde se requiera.

Donde las máquinas eléctricas son dispositivos capaces de convertir la energía mecánica en eléctrica o de energía eléctrica a mecánica, en el caso industrial son las más utilizadas en el mercado como motores.

Lo destacado que justifica la aplicación masiva de la máquina de inducción hoy en día, en su sencillez constructiva y en la robustez que ofrecen estos convertidores durante la operación en regimenes de alto desempeño; es decir, en arranques y paradas frecuente, operación continua, sobrecarga, ambientes corrosivos o explosivos, etc. Estos motores de inducción requieren un mantenimiento mínimo, pueden operar en ambientes peligrosos y tienen una tasa de falla muy reducida, donde algunas limitaciones como el ajuste de la característica par-velocidad, la intensidad de la corriente durante el arranque,

la regulación de la velocidad y el rendimiento han sido resueltas o mejoradas con diseños ingeniosos desarrollando primero el rotor con anillos deslizantes que permitía conectar resistencias externas y regular el arranque. Posteriormente se incorporo el rotor de doble jaula de ardilla permitiendo cambiar los parámetros del rotor de la máquina.

Cabe mencionar que las máquinas eléctricas sufren de innumerables actualizaciones, por lo que es necesario documentar los avances a los cuales la sociedad va orientando el uso de las máquinas de inducción polifásicas.

#### **1.4 Metodología.**

La FIE cuenta con equipo necesario para un buen levantamiento de información experimental, donde la MIJA será la máquina a analizar por su simplicidad. Cuenta además con electro dinamómetros, multímetros digitales y de gancho, consolas, bandas, juegos de puntas, tacómetros, etc. Donde se levantara la información de forma estadística hasta que la información levantada sea la más cercana a los datos nominales de operatividad de dichas máquinas.

Además la presente tesis se recopila una breve teoría referente a las máquinas, desde un proceso energético, la máquina generalizada y una breve teoría referente a los principios de la máquina de inducción polifásica. La información teórica recopilada tendrá mayor sostén al visualizarse la operatividad de las máquinas de inducción con su teoría.

#### **1.5 Descripción del problema.**

Hoy en día, la sociedad reclama mejores profesionistas en el área de la ingeniería, mejor preparados, donde el estudiante de la FIE con el cambio del plan de estudios anual a semestral, cuenta con un plan de estudios muy comprimido donde se requiere de material bibliográfico, más resumido que involucre un lenguaje comprensible para alumnos, maestros o personas que deseen familiarizarse con las máquinas en el caso particular de la máquina de inducción trifásica.

También se requiere de información concreta correctamente levantada de forma experimental, que oriente a dichas personas, ya que se puede caer en el error de tomar muestras experimentales de forma errónea.

## **1.6 Descripción de Capítulos.**

En el Capítulo 1 se presentan los antecedentes más relevantes sobre la maquina de inducción polifásica, la descripción de los objetivos, justificación y metodología.

En el Capítulo 2 se describen los principios de conversión de energía electromecánica, mencionando teoremas y leyes que ayudan a comprender con más detalle dichos principios.

En el Capítulo 3 se analizarán conceptos básicos de las máquinas rotatorias, con un enfoque a la máquina de inducción.

En el Capítulo 4 se presenta teóricamente la máquina de inducción polifásica.

En el Capítulo 5 se reportan pruebas realizadas a la máquina de inducción obtenidos por mediciones experimentales.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones generales de esta tesis y los trabajos futuros.

## Capítulo 2

# Principios de conversión de energía electromecánica

### 2.1 Introducción

En este capítulo se presenta el proceso de conversión de energía electromecánica, el cual ocurre a través de un campo eléctrico o magnético, donde los motores y los generadores, comprenden la categoría de los equipos de conversión de energía. Así mismo se describe el principio de conversión de energía electromecánica y se analizan los dispositivos que desempeñan esta función.

El análisis consta de aspectos fundamentales de conversión de la energía, en la parte mecánica a eléctrica, mediante los generadores, y en la parte eléctrica a mecánica mediante los motores.

### 2.2 Leyes y formulaciones de la conversión de energía electromecánica

La ciencia en la ingeniería clama por nuevos procesos prácticos de conversión de energía, la demanda de energía a nivel local, nacional y mundial, donde la necesidad de reforzar las nuevas fuentes de energía o los procesos de conversión de energía, es muy probable que al menos una gran parte de ellos hagan uso de los motores eléctricos para realizar trabajo mecánico.

Todas las máquinas eléctricas rotatorias operan bajo los mismos principios y obedecen las mismas leyes fundamentales, a continuación se enumeran algunas leyes de acuerdo a sus descubridores:

- a) Ley de inducción de Faraday.- Esta ley fue cuantificada por Neumann y relacionada en forma espacial por Fleming. Más adelante, Lenz clarifico su significado en las relaciones transitorias para la inducción magnética. Donde la ley de Faraday enuncia que:

$$e_{ind} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

Donde:

- $e_{ind}$  Voltaje inducido en la bobina
- $N$  Número de vueltas de alambre en la bobina
- $\phi$  Flujo que circula en la bobina

El signo menos en la Ecuación 2.1 es una expresión de la ley de Lenz, la cual establece la dirección del voltaje inducido en la bobina, ya que si sus extremos estuvieren en cortocircuito, se produciría en ella una corriente que generaría un flujo opuesto al flujo inicial. Donde la Figura 2.1 define que:

*“El voltaje inducido en una espira o bobina de un conductor es proporcional a la rapidez de cambio de las líneas de fuerza que atraviesan la bobina”.*

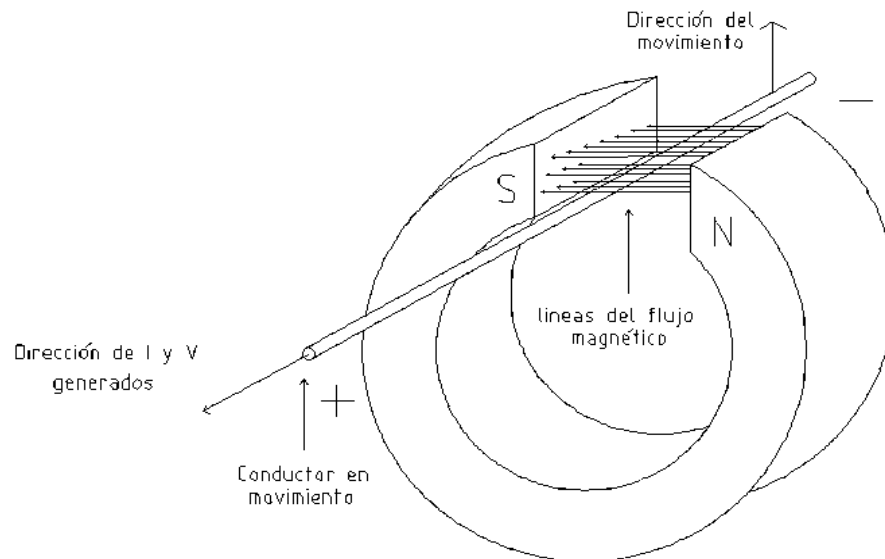


Figura 2.1 Relación de Faraday

- b) Leyes de los voltajes y de las corrientes de Kirchhoff, estas leyes permiten entender y predecir los arreglos en serie y en paralelo de las bobinas de las máquinas y los circuitos de carga.
- c) Ley de los circuitos magnéticos de Ampere.- Permite entender y diseñar la parte magnética de las máquinas.

$$\oint H \cdot dl = I_{net} \quad (2.2)$$

Donde:

$H$  Intensidad del campo magnético producida por la corriente  $I_{net}$ .

$dl$  Diferencial a lo largo de la trayectoria de integración.

$I_{net}$  Flujo neto.

d) Ley de Ohm, relaciona el voltaje, la corriente y la resistencia, y permite establecer las proporciones en las bobinas de motores y generadores.

$$R = \frac{V}{A} \quad (2.3)$$

Donde:

$R$  Resistencia en ohms ( $\Omega$ )

$V$  Voltaje en volt (V)

$A$  Corriente en Amperes (A)

e) Ley de Biot y Savart proporciona la fuerza que un campo magnético ejerce sobre un conductor, mediante la que se calculan las fuerzas producidas por un motor y las fuerzas de entrada requeridas para accionar un generador.

f) El calculo de Watt de la relación entre fuerza, trabajo, tiempo y potencia. Aun cuando James Watt no hizo trabajos sobre electricidad.

$$P = \tau\omega \quad (2.4)$$

Donde:

La Ecuación 2.4 describe la potencia mecánica aplicada al eje de un motor o de un generador, y es la relación correcta entre la potencia, el par y la velocidad,

La potencia se mide en Watts, el par en Newton-metro y la velocidad en radianes por segundo.

g) Formulación de Neumann, cuantificó la proposición de Faraday mediante la Ecuación 2.5:

$$E_{prom} = \frac{\pi * 10^{-8}}{t} \frac{V}{vuelta} \quad (2.5)$$

Es decir:

$E_{prom}$  Voltaje promedio rectificado que se genera por cada espira, sus unidades son volts/vuelta.



$\pi$  Líneas de fuerza que son atravesadas o enlazadas por una sola espira, En una maquina bipolar esto ocurre en un cuarto de revolución, es decir;  $4 \cdot \text{líneas/vueltas} \cdot \text{revoluciones}$ .

Nota: Las vueltas son el número de veces que un alambre se enrolla, mientras que las revoluciones se refieren a la rotación mecánica.

$t$  Tiempo en el cual las líneas son enlazadas por las vueltas de alambre, sus unidades son revoluciones/4 s.

Nota: Este término se invierte al utilizarse, y es permisible.

10-8 Enlaza  $10^8$  líneas cada segundo a fin de inducir un volt, es decir;  $10^{-8}$  volts \*s/líneas.

h) Ley de fuerza de Lorentz, es la ecuación básica de la fuerza en campos eléctricos y campos magnéticos, donde:

$$F = q(E + v * B) \quad (2.6)$$

Es decir:

$F$  Fuerza sobre una partícula en newton.

$q$  Carga en presencia de campos eléctricos y magnéticos, en coulombs.

$E$  Campo eléctrico en volts.

$v$  Velocidad de la partícula en metros por segundo.

$B$  Campo magnético en telas [Richardson y Caisse, 2008]..

### 2.3 Fuerzas y pares de los sistemas de campos magnéticos

De la Ecuación 2.6, en un sistema de campo eléctrico puro, la fuerza se determina mediante la carga de la partícula y el campo eléctrico.

$$F = qE \quad (2.7)$$

La fuerza actúa en la dirección del campo eléctrico y es independiente de cualquier movimiento de las partículas. En los sistemas de campo magnético puro, la fuerza es un poco más compleja.

$$F = q(v * B) \quad (2.8)$$

Analizando el campo eléctrico y el campo magnético por separado, se establece la “regla de la mano derecha”, la cual establece que el pulgar de la mano derecha señala en la dirección de  $v$  y el dedo índice señala en la dirección de  $B$ , la fuerza, que es perpendicular a las direcciones de  $B$  y  $v$ , señala en la dirección usual de la palma de la mano como se muestra en la Figura 2.2.

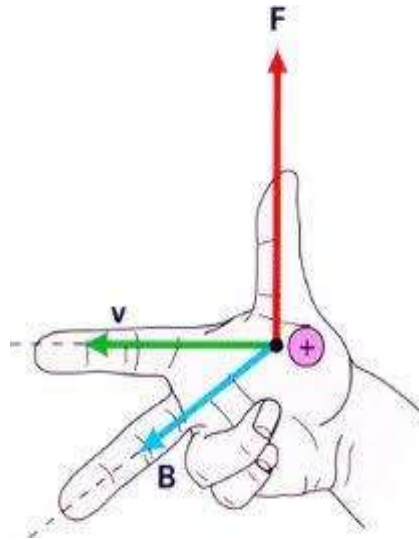


Figura 2.2 Regla de la mano derecha de la fuerza de Lorentz

En situaciones en las que un gran número de partículas cargadas se encuentran en movimiento, se reelabora la Ecuación 2.6 en términos de la densidad de carga  $p$  (dimensionada en coulombs por metro cúbico).

$$F_v = p(E + v * B) \quad (2.9)$$

Donde el producto  $pv$  se denomina densidad de corriente:

$$J = pv \quad (2.10)$$

Cuyas unidades son en *amperes por metro cuadrado*, sustituyendo la Ecuación 2.10 en la Ecuación 2.8 se escribe como:

$$F = J * B \quad (2.11)$$

La mayoría de los problemas cotidianos no son tan simples y sencillos como lo muestra la Ecuación 2.11, por lo que la mayoría de los dispositivos de conversión de energía electromecánica contienen material magnético, por tal motivo las técnicas para localizar las fuerzas precisas que actúan sobre los materiales magnéticos son

extremadamente complejas y requieren de conocimientos detallados acerca de la distribución del campo a través de todo el sistema. Donde la ventaja de los dispositivos de conversión de energía electromecánica se construye a partir de estructuras rígidas que no se deforman. El funcionamiento de estos dispositivos se determina por medio de la fuerza neta o par que actúa en los componentes en movimiento, y rara vez es necesario calcular los detalles de la distribución de la fuerza interna.

La técnica más utilizada se conoce como el método de la energía y se basa en el principio de conversión de energía, donde el campo eléctrico contiene 2 variables en sus terminales, un voltaje  $e$  y una corriente  $i$ , y la terminal mecánica también presenta 2 variables una fuerza  $f_{fd}$  y una posición  $x$ , la razón de cambio  $W_{fld}$  y la energía acumulada en el campo magnético, es igual a la entrada de potencia eléctrica menos la salida de la potencia mecánica del sistema, como se muestra en la Figura 2.3 [Fitzgerald et al, 2003].

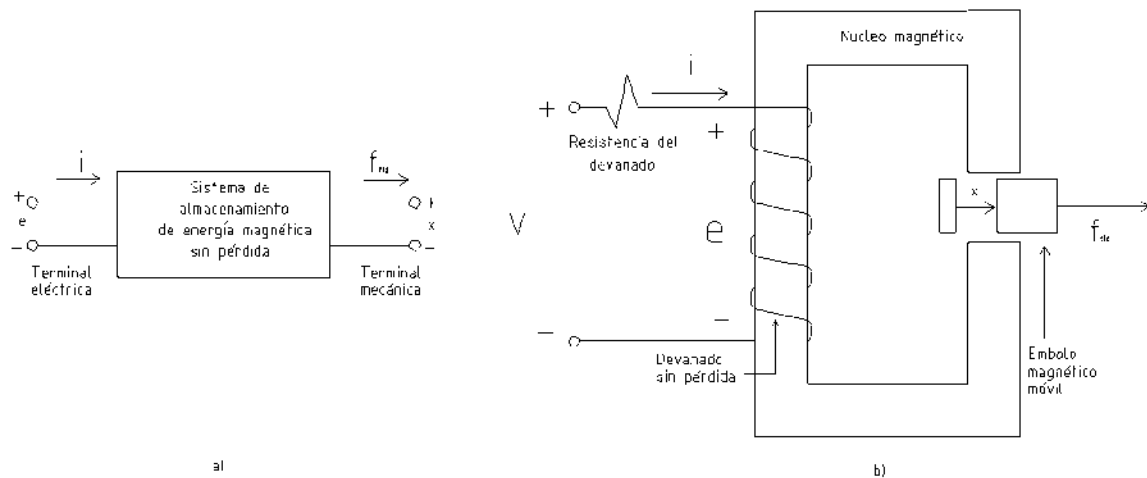


Figura 2.3 a) Esquema de un dispositivo de conversión electromecánica de campo magnético  
 b) Dispositivo de producción de fuerza simple.

## 2.4 Energía balanceada

El principio de la conservación de la energía establece que la energía ni se crea ni se destruye; solo se transforma. Este resultado es bastante general donde el mecanismo de almacenamiento de energía se realiza dentro de los campos magnéticos.

$$\left( \begin{array}{l} \text{Entrada de energía} \\ \text{a partir de fuentes} \\ \text{eléctricas} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{Salida} \\ \text{de energía} \\ \text{mecánica} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{Incremento de la energía} \\ \text{acumulada dentro del} \\ \text{campo magnético} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{Energía} \\ \text{convertida} \\ \text{en calor} \end{array} \right) \quad (2.12)$$

La Ecuación 2.12, está elaborada en términos mecánicos y eléctricos con valores positivos en movimiento, de igual modo a la acción del generador: adquieren valores negativos. En cualquiera de los dos casos la generación de calor dará como resultado un flujo de energía térmica fuera del sistema.

La capacidad para identificar un sistema de almacenamiento de energía sin pérdidas, nos da como resultado de la Figura 2.3a la Ecuación 2.13.

$$dW_{electr} = dW_{mec} + dW_{fld} \quad (2.13)$$

Donde:

$dW_{electr}$  diferencial de la entrada de energía eléctrica.

$dW_{mec}$  diferencial de la salida de energía mecánica,

$dW_{fld}$  diferencial del cambio en la energía magnética acumulada.

A partir de la Ecuación 2.13, se formula que:

$$dW_{electr} = e i dt \quad (2.14)$$

Donde  $e$  es el voltaje inducido en las terminales eléctricas, es a través de este voltaje que el circuito eléctrico externo suministra potencia al campo magnético de acoplamiento y por lo tanto en las terminales mecánicas de salida.

## 2.5 Energía en sistemas de campo magnético de excitación única

Considerando el relé electromagnético de la Figura 2.4, la resistencia de la bobina de excitación se presenta como una resistencia externa  $R_{ext}$ , las variables de la terminal mecánica se muestran como una fuerza  $f_{fld}$  producida mediante el campo magnético y un desplazamiento  $x$ , donde; las pérdidas mecánicas se incluyen como elementos externos conectados en la terminal mecánica. Como consecuencia, el núcleo magnético y el armazón constituyen un sistema de almacenamiento energético magnético sin pérdida.

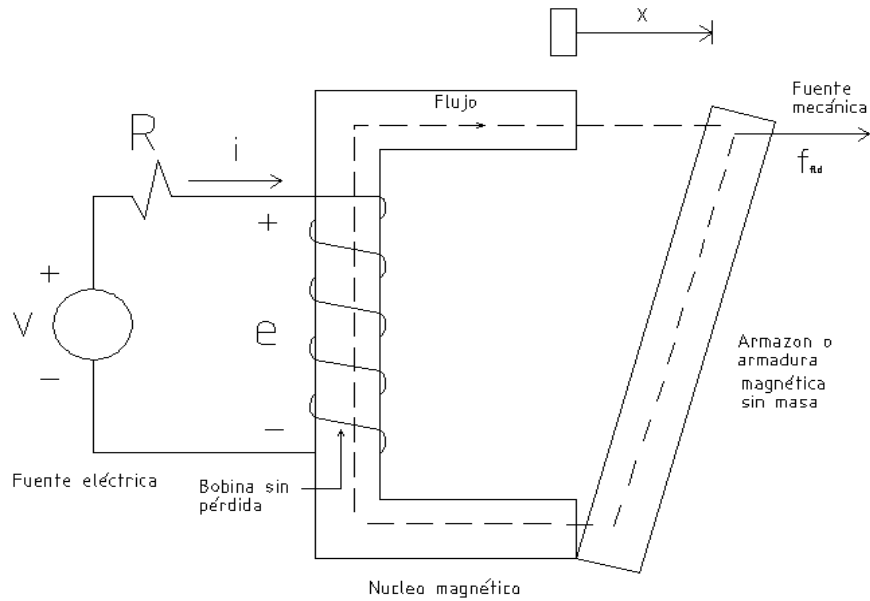


Figura 2.4 Diagrama esquemático de un relé electromagnético.

Debido a la simplicidad de las ecuaciones resultantes las dispersiones de flujo  $\lambda$  y la corriente  $i$  se consideran lineales mediante una inductancia y por la posición del armazón o armadura  $x$  donde se indica la dependencia explícita de  $L$  sobre  $x$ .

$$\lambda = L(x)i \quad (2.15)$$

Dada la definición de la fuerza magnética  $f_{fd}$  actúa a partir del relé sobre el sistema mecánico externo y  $dW_{mec}$  se define como la salida de energía mecánica del relé, se formula que:

$$dW_{mec} = f_{fd}dx \quad (2.16)$$

Al aplicar la Ecuación 2.16 y al sustituir  $dW_{elec} = id\lambda$ , se formula la Ecuación 2.13 de la siguiente forma:

$$dW_{fd} = id\lambda - f_{fd}dx \quad (2.17)$$

Como el sistema de almacenamiento es sin pérdida, es un sistema conservativo y el valor de  $W_{fd}$ , determinado por  $\lambda$  y  $x$ ;  $\lambda$  y  $x$  se refieren a un estado variable, puesto que lo valores determinan el estado del sistema.

## 2.6 Determinación de fuerzas magnéticas y pares a partir de la energía y coenergía

Suponiendo que en un núcleo con flujo y corriente inicial de cero, se encuentra incrementada a un valor  $I_{\phi_1}$  se tendrá que la energía suministrada al núcleo por la fuente, esta dada por:

$$W_e = \int_0^{\lambda_1} i_{\phi} d\lambda = \int_0^{\phi_1} F d\phi \quad (2.18)$$

Donde  $\phi_1$  y  $\lambda_1$ , son el flujo y los enlazamientos de flujo, correspondientes a la corriente  $I_{\phi_1}$ .

La Ecuación 2.18, muestra que cuando se incrementa el campo magnético asociado con un núcleo, la energía fluye de la fuente al campo. Esta energía es almacenada por el campo magnético tanto tiempo como el campo se mantenga al mismo valor, en este caso a  $\phi_1$ .

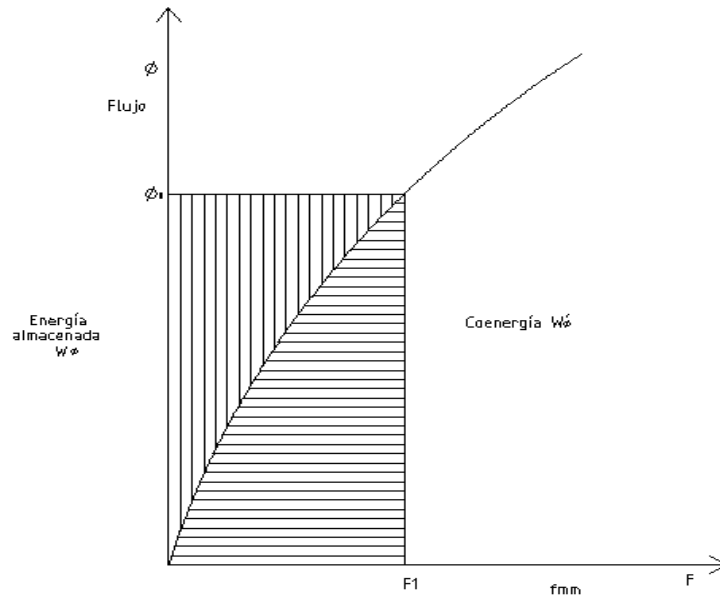


Figura 2.5 Energía almacenada y coenergía.

La energía almacenada se encuentra frecuentemente representada por:

$$W_{\phi} = \int_0^{\lambda_1} i_{\phi} d\lambda = \int_0^{\phi_1} F d\phi \quad (2.19)$$

Y la coenergía esta representada por:

$$W_{\phi}^c = \int_0^{F_1} \phi dF \quad (2.20)$$

En la Figura 2.5, se representa gráficamente el área entre las curvas de flujo vs fuerza-magnetomotriz (fmm) y el eje de flujos (zona sombreada verticalmente), la zona sombreada horizontalmente se llama coenergía, donde coenergía no tiene un significado físico, pero se ha encontrado de utilidad en el cálculo de fuerzas en aparatos electromecánicos.

Por definición de energía y coenergía en el campo magnético se destacan las siguientes observaciones:

1. Para la energía, el enlace de flujo, es la variable independiente, y la corriente  $i$  es la variable dependiente.
2. Para la coenergía, la corriente  $i$  es la variable independiente y el enlace de flujo es la variable dependiente.

## 2.7 Pérdida de energía en los núcleos ferromagnéticos

Cuando son disminuidos los campos magnéticos asociados con núcleos ferromagnéticos, parte de la energía almacenada es regresada a la fuente o convertida en alguna otra forma útil de energía, parte de la energía se pierde irremediamente en el núcleo en forma de calor. Esta pérdida de energía es debida a dos causas:

- a) Características de histéresis del material
- b) Corrientes inducidas en el núcleo (más conocidas como corrientes parasitas o de eddy).

### 2.7.1 Pérdida por histéresis

Suponiendo que un núcleo ferromagnético es excitado por una bobina alimentada de una fuente de variación periódica de corriente y que la onda de histéresis del material magnético es como se muestra en la Figura 2.6, suponiendo que la amplitud de la fuerza magnetizante varía de  $+i_{\text{máx}}$  y  $-i_{\text{máx}}$  y la variación de la densidad de flujo es de  $+\lambda_{\text{máx}}$  y  $-\lambda_{\text{máx}}$ . Se considera un ciclo completo de magnetización partiendo de 0.

Donde la energía  $W$  no se regresa a la fuente, sino que es disipada en el material ferromagnético en forma de calor [Gourishankar, 1990]

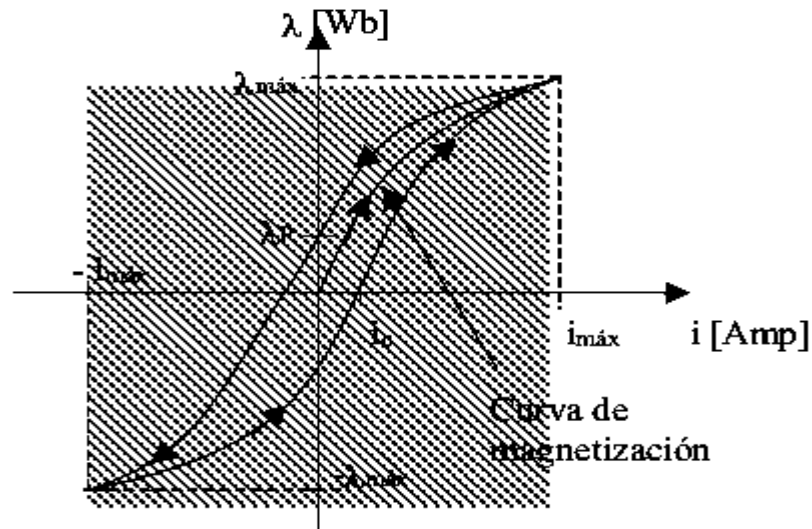


Figura 2.6 Anillo de histéresis.

### 2.7.2 Pérdida por corrientes parásitas

Estas corrientes varían de manera proporcional al cuadrado de la densidad de flujo, la frecuencia y el espesor de las laminaciones. En condiciones normales de la máquina se expresa, con una aproximación bastante cercana, como lo muestra la Ecuación 2.21:

$$P_e = K_e (B_{\max} f \delta)^2 \quad (2.21)$$

Donde:

- $\delta$       Espesor de laminación
- $B_{\max}$     Densidad máxima de flujo
- $f$         Frecuencia
- $K_e$       Constante de proporcionalidad

El valor de  $K_e$  depende de las unidades usadas, del volumen del hierro y la resistividad de éste.

La Figura 2.7, muestra las corrientes parásitas o de Eddy de una placa de metal, donde se mueve un campo magnético.



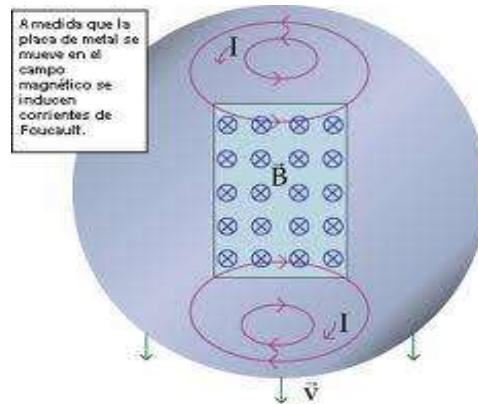


Figura 2.7 Corrientes parasitas o de Eddy.

## 2.8 Conclusiones

En el presente capítulo se concluye el manejo de las máquinas eléctricas en el caso de la conversión electromecánica, todas las máquinas eléctricas manejan los mismos principios elementales de funcionamiento, cabe destacar que siguen vigentes estos principios a pesar de ser ya muy antiguos, donde se puede comprender las fuerzas mecánicas ejercidas por un campo magnético. El uso de la ecuación de la fuerza de Lorentz es un método que se usa comúnmente, se basa en el principio de la conservación de la energía al cual se encuentran sujetos todos los sistemas físicos.

Los motores y generadores de corriente alterna usan como enlace las partes eléctricas y mecánicas de muchos dispositivos mecánicos, donde el campo magnético sirve como un agente de conversión de energía eléctrica en mecánica o viceversa.

Sobre pérdidas de energía se pierden irremediablemente al completarse un ciclo completo de magnetización en forma de calor, a este hecho se le conoce como pérdida por histéresis y por efecto Joule si se habla de corrientes parasitas.

Al hablar de conversión de energía electromecánica, involucra ver muchos aspectos y principios fundamentales, donde este capítulo de esta tesis toma en cuenta la conversión de energía en forma de bosquejo.

# Capítulo 3

## Conceptos básicos de las máquinas rotatorias

### 3.1 Introducción

Las máquinas eléctricas han evolucionado a mediados del siglo XIX y aun continúan en la actualidad. Donde los modelos analíticos de las máquinas eléctricas convencionales pueden ser notablemente simplificados cuando se realizan las hipótesis apropiadas y se utilizan las transformaciones de las coordenadas de las variables de estado, a sistemas de coordenadas donde el comportamiento de estos convertidores se independizan de la posición angular del rotor.

### 3.2 Conceptos elementales

En máquinas de rotación, los voltajes se generan en los devanados o en los grupos de bobinas al girar estos devanados de manera mecánica a través de un campo magnético, al girar mecánicamente un campo magnético por el devanado o al diseñar el circuito magnético de manera que la reluctancia varíe con la rotación del rotor. El acoplamiento cambia de forma cíclica y se genera un voltaje variante en el tiempo.

Al conjunto de bobinas conectadas entre sí, se le denomina devanado de armadura o inducido, donde al término devanado de armadura o inducido se emplea a un devanado o conjunto de devanados en una máquina de rotación que lleva corrientes alternas. En máquinas de corriente alterna, como son las máquinas asíncronas o de inducción, el devanado de armadura o inducido se encuentra en la porción estacionaria del motor conocido como el estator, también se les conoce como devanados estáticos.

En dichas máquinas, tanto el estator como las estructuras del rotor están sujetos al flujo magnético variante en el tiempo y ambos requieren de láminas para reducir las pérdidas debidas a las corrientes de eddy. Las máquinas eléctricas de rotación tienen diversas presentaciones y se denominan mediante diferentes nombres, entre las más conocidas son: de corriente directa, síncrona, de inducción, etc. Dichas máquinas en

aparición son similares en principios básicos que controlan su funcionamiento; con frecuencia es útil considerar esta maquinaria en términos del mismo cuadro físico. Una máquina de inducción funciona sobre la base del mismo principio; así, es posible identificar las distribuciones de flujo que se asocian con el rotor y el estator. Aunque dentro del sincronismo estas distribuciones no son estáticas sino más bien rotacionales, dichas distribuciones se desplazan mediante una separación angular constante, y el par se produce por medio de una tendencia de dichos flujos a alinearse.

### **3.3 Introducción a la máquina de inducción**

En las máquinas de inducción, las corrientes del rotor se inducen en los devanados del mismo por una combinación de la variación temporal de las corrientes del estator y mediante el movimiento del rotor relativo al estator.

Como ocurre en las máquinas síncronas, el devanado del estator de una máquina de inducción se excita con corrientes alternas, estas corrientes alternas se aplican directamente en los devanados del estator y fluyen en los devanados del rotor. Por lo tanto las corrientes del rotor se producen por inducción. La máquina de inducción se considera como un transformador generalizado en el que la energía eléctrica se transforma entre el rotor y el estator, los cuales están ligados a un cambio de frecuencia y un flujo de energía mecánica. Aunque el motor de inducción es el más común de todos los tipos de motores, se utiliza en contadas ocasiones como un generador, ya que sus características de desempeño como generador son poco satisfactorias en la mayoría de sus aplicaciones. La máquina de inducción se aplica como un transformador de frecuencias.

En el motor de inducción, los devanados del estator en esencia son los mismos que presenta la máquina síncrona. Sin embargo, los devanados del rotor se encuentran en corto circuito y con frecuencia no presentan conexiones externas; las corrientes se inducen mediante la acción del transformador a partir del devanado del estator. El rotor de una máquina de inducción no rota en sincronía ya que el deslizamiento del rotor con respecto al flujo del devanado armadura o de inducido síncrono el que da auge a las corrientes del rotor inducidas y como consecuencia el par. Además de operar a velocidades menores en comparación con la velocidad mecánica síncrona [Fitzgerald, et al, 2003].

### 3.4 Bobinas ortogonales

La distribución sinusoidal en el espacio de la densidad de campo es obtenida a partir de la suma vectorial de dos componentes ortogonales  $B_{\alpha}$  y  $B_{\beta}$ . En las máquinas eléctricas convencionales se distribuyen los conductores en la periferia de la máquina para que al inyectar las corrientes que se muestran en la Figura 3.1 y 3.2, resulte el flujo aproximadamente sinusoidal, donde se muestran dos bobinas colineales cuyo eje magnético coincide con la amplitud de la distribución espacial del campo y se encuentra orientada según su respectivo eje.

Los componentes ortogonales solamente pueden variar en magnitud o signo, pero no en dirección. Las dos componentes poseen el mismo periodo espacial y se encuentran en cuadratura, según la posición relativa de los devanados, estas consideraciones son validas tanto para el rotor como para el estator de las máquinas eléctricas rotativas.

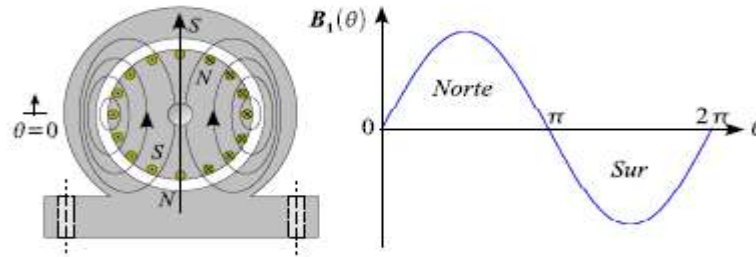


Figura 3.1 Polo norte y sur de un cilindro

### 3.5 Múltiples pares de polos

En una distribución del flujo en la máquina el campo es positivo cuando el flujo sale de la superficie y en el resto del cilindro, es negativo cuando el flujo penetra en la superficie del cilindro. La zona del cilindro en el cual hay salida de flujo se define como polo norte y la región por la cual penetra el flujo a la superficie se define como polo sur, la Figura 3.1, ilustra el polo norte y sur de un cilindro excitado por dos conductores.

Las máquinas eléctricas pueden ser diseñadas de tal manera que existan varios polos norte y varios polos sur, en la Figura 3.2 existen dos polos norte y dos polos sur alternados entre si. En una máquina con múltiples pares de polos se definen ángulos eléctricos y mecánicos. Para definir los ángulos eléctricos se acota un paso polar de la

máquina, es decir la zona comprendida por un par de polos y se define este ángulo mecánico como  $2\pi$  radianes eléctricos.

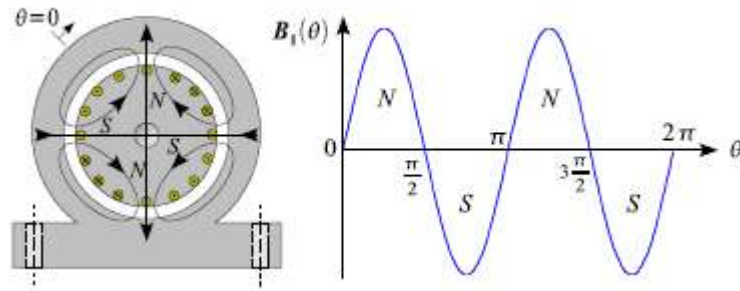


Figura 3.2 Cilindro con dos pares de polos

La Figura 3.3, muestra el concepto de radianes eléctricos en una máquina de tres pares de polos. Entre  $0$  y  $2\pi/3$  radianes mecánicos se definen  $2\pi$  radianes eléctricos.

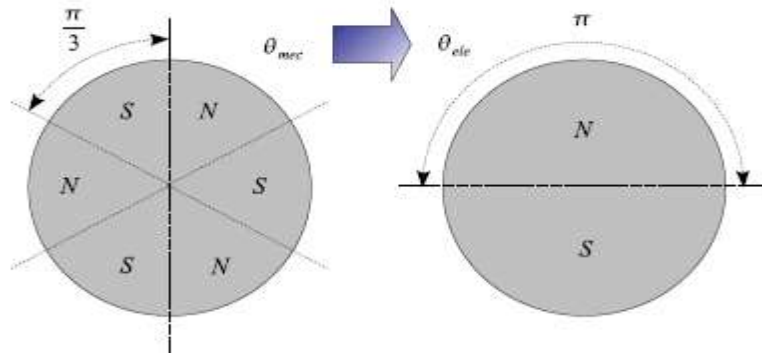


Figura 3.3 Definición de ángulos eléctricos y mecánicos

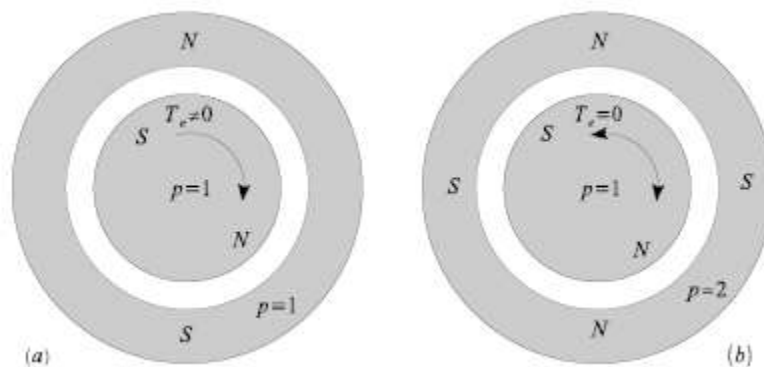


Figura 3.4 a) Máquina con iguales números de pares de polos en el rotor y estator, b) Máquina con diferentes números de pares de polos en el rotor y estator

En la Figura 3.4, se muestra en el inciso (a) los polos norte y sur donde intentan alinearse, para reducir al mínimo posible la longitud de los enlaces de flujo y la energía

almacenada en el campo. En el inciso (b) se producen pares iguales y opuestos, y por esta razón el par total sobre los ejes es nulo.

### 3.6 La máquina generalizada

Las máquinas eléctricas rotativas poseen características comunes entre si, donde se asemejan al modelo de la Figura 3.5, pero lo más característico es la existencia de dos superficies cilíndricas con movimiento relativo entre una y otra.

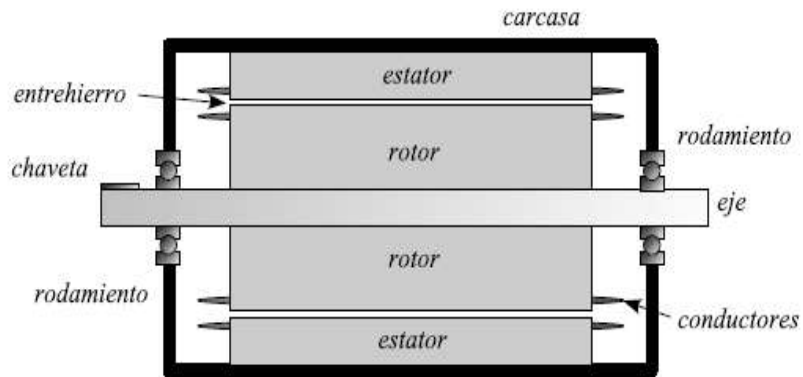


Figura 3.5 Partes de una máquina eléctrica rotativa

La máquina eléctrica generalizada posee cuatro ejes eléctricos por los cuales se inyectan las corrientes y un eje mecánico o eje de giro, En la Figura 3.6, se representa el esquema de las bobinas ortogonales de la máquina generalizada.

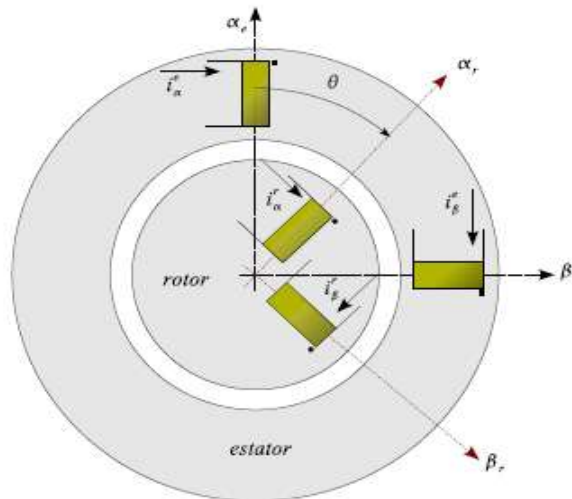


Figura 3.6 Esquema de la máquina generalizada

Definiendo a  $T_m$  como el par mecánico en el eje de la máquina, las ecuaciones de la máquina en forma matricial compacta, son:

$$[u] = [R][i] + \dot{\theta}[\tau(\theta)][i] + [L(\theta)]\frac{d}{dt}[i] \quad (3.1)$$

$$T_m = -\frac{1}{2}[i]^t[\tau(\theta)][i] + J\dot{\theta} + \rho\dot{\theta} \quad (3.2)$$

Donde:

$T_m$  Par mecánico

$\rho$  Coeficiente de fricción

$J$  Inercia del eje de rotación

$[i]$  Variable de estado

$\theta$  Ángulo theta

$\frac{d\theta}{dt}$  Velocidad angular, denominada también  $\omega_m$

En la Ecuación 3.2, es necesario determinar las matrices de resistencias  $[R]$ , inductancias en función del ángulo  $[L(\theta)]$ , así como la derivada con respecto al ángulo  $\theta$  de la matriz de inductancias, también denominada matriz de par  $[\tau(\theta)]$ .

### 3.6.1 La matriz de resistencias

La matriz de resistencias de la máquina eléctrica generalizada es diagonal porque todas las resistencias son propias de cada bobina y no existen resistencias mutuas debido a que los devanados están aislados galvánicamente:

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{e\alpha} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{e\beta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{r\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

### 3.6.2 La matriz de inductancias

Si la máquina posee un rotor cilíndrico y homogéneo, al girar no se modifica la permeancia del camino magnético, por esta razón la inductancia propia del estator no depende de la posición del rotor. La inductancia propia del estator es constante e independiente del ángulo  $\theta$ , se calcula como:

$$L_e = N_e^2 \cdot P_e \quad (3.4)$$

Si el estator es cilíndrico, la inductancia propia del rotor es constante, y poseen el mismo número de vueltas y lo mismo ocurre con las bobinas del rotor, los términos de la diagonal de la matriz de inductancias son:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_e & ? & ? & ? \\ ? & L_e & ? & ? \\ ? & ? & L_r & ? \\ ? & ? & ? & L_r \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Las inductancias mutuas entre los devanados  $\alpha$  y  $\beta$  del estator son cero porque estas bobinas son ortogonales y el flujo que se produce en una de ellas no puede enlazar a la otra. La misma situación sucede con los devanados del rotor:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_e & 0 & ? & ? \\ 0 & L_e & ? & ? \\ ? & ? & L_r & 0 \\ ? & ? & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

La inductancia mutua entre la bobina  $\alpha$  del estator y  $\alpha$  del rotor es máxima cuando ambos devanados se encuentran alineados, es decir con  $\theta=0$ . Para representar este valor de la inductancia mutua se debe utilizar un término en  $\cos \theta$ .

Una situación semejante se presenta entre el eje  $\beta$  del estator y el eje  $\beta$  del rotor. La inductancia mutua entre las bobinas  $\alpha$  del rotor y  $\beta$  del estator es máxima cuando  $\theta = \frac{\pi}{2}$ ; esto se representa mediante un término en  $\sin \theta$ . La inductancia mutua entre el

devanado  $\beta$  del rotor y  $\alpha$  del estator es máxima cuando  $\theta = -\frac{\pi}{2}$ ; por esta razón esta inductancia se puede representar mediante un término  $-\sin \theta$ . De esta forma y recordando que la matriz de inductancias es simétrica, se obtiene:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_e & 0 & L_{er} \cos \theta & -L_{er} \sin \theta \\ 0 & L_e & L_{er} \sin \theta & L_{er} \cos \theta \\ L_{er} \cos \theta & L_{er} \sin \theta & L_r & 0 \\ -L_{er} \sin \theta & L_{er} \cos \theta & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (3.7)$$



### 3.6.3 Matriz de par

La matriz de par  $[\tau(\theta)]$  se calcula derivando con respecto al ángulo  $\theta$  la matriz de inductancias de la máquina:

$$[\tau(\theta)] = \frac{d}{d\theta} [L] \quad (3.8)$$

De esta forma se obtiene:

$$[\tau(\theta)] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -L_{er} \text{sen} \theta & -L_{er} \text{cos} \theta \\ 0 & 0 & L_{er} \text{cos} \theta & -L_{er} \text{sen} \theta \\ -L_{er} \text{sen} \theta & L_{er} \text{cos} \theta & 0 & 0 \\ -L_{er} \text{cos} \theta & -L_{er} \text{sen} \theta & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

### 3.7 La máquina trifásica

La máquina trifásica dispone de tres devanados repartidos simétricamente en la periferia del cilindro. En la Figura 3.7, se representa la configuración esquemática de este tipo de máquinas así como de las tres corrientes que se han inyectado en las bobinas  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . y las fuerzas magnetomotrices que estas corrientes producen en el tiempo inicial ( $t=0$ ) como fasores. En el instante inicial las corrientes que circulan por las tres bobinas son:

$$\begin{aligned} i_a(0) &= I_{\max} \\ i_b(0) &= -\frac{1}{2} I_{\max} \\ i_c(0) &= -\frac{1}{2} I_{\max} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Para demostrar que el campo magnético originado por las corrientes de la Figura 3.7 es rotatorio, se expresan estas corrientes como:

$$\begin{aligned} i_a(t) &= I \cos(\omega t - \alpha) \\ i_b(t) &= I \cos(\omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c(t) &= I \cos(\omega t - \alpha - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (3.11)$$

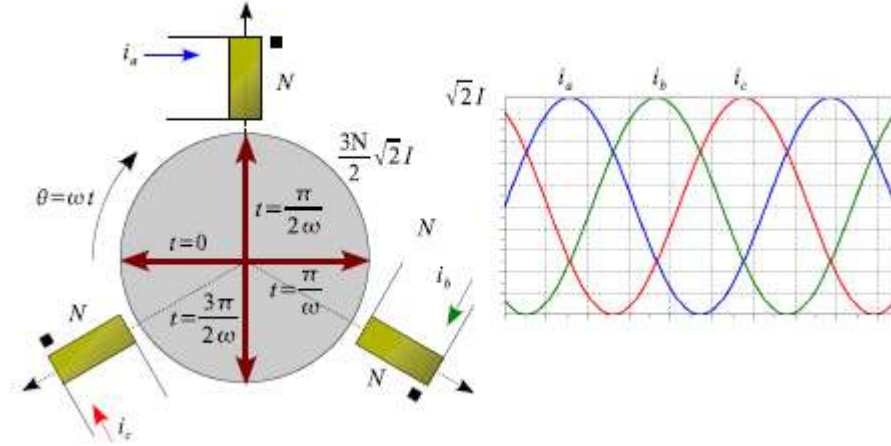


Figura 3.7 Corrientes y fuerzas magnetomotrices de la máquina trifásica

Si  $\theta$  es la dirección de un punto cualquiera en el entrehierro medido a partir del eje magnético de la bobina “a”, se obtiene:

$$F(\theta, t) = Ni_a \cos \theta + Ni_b \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) + Ni_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.12)$$

Sustituyendo la Ecuación 3.11 en la Ecuación 3.12 se obtiene:

$$F(\theta, t) = NI \left\{ \begin{array}{l} \cos(\omega t - \alpha) \cdot \cos \theta + \dots \\ \dots + \cos\left(\omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) + \dots \\ \dots + \cos\left(\omega t - \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{array} \right\} \quad (3.13)$$

Aplicando las propiedades trigonométricas para el producto de cosenos se obtiene:

$$F(\theta, t) = \frac{NI}{2} \left\{ \begin{array}{l} \cos(\omega t - \alpha + \theta) + \cos(\omega t - \alpha - \theta) + \dots \\ \dots + \cos\left(\omega t - \alpha + \theta + \frac{2\pi}{3}\right) + \cos(\omega t - \alpha - \theta) + \dots \\ \dots + \cos\left(\omega t - \alpha + \theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos(\omega t - \alpha - \theta) \end{array} \right\} \quad (3.14)$$

En la Ecuación 3.14, los términos primero, tercero y quinto de la sumatoria de coseno son cero porque el desfase entre ellos es de  $2\pi/3$ , con esta consideración se obtiene:

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} NI \cos(\omega t - \alpha - \theta) \quad (3.15)$$

Esta expresión permite determinar la fuerza magnetomotriz en el espacio y en el tiempo. Si se fija la posición, es decir; el ángulo  $\theta$  es constante, la Ecuación 3.15 determina que en esa posición la fuerza magnetomotriz varía sinusoidalmente en el tiempo, si se congela el tiempo la Ecuación 3.15 determinaría la fuerza sinusoidal en el espacio. La ecuación anterior demuestra que en una máquina eléctrica trifásica, alimentada por tres corrientes balanceadas y desfasadas  $2\pi/3$  en el tiempo produce un campo magnético rotatorio similar al producido por dos devanados ortogonales a los cuales se les inyecten corrientes sinusoidales desfasadas  $\pi/2$ .

### 3.8 Concepto de deslizamiento

En la máquina de inducción se puede obtener un par promedio diferente de cero en un amplio rango de velocidades mecánicas. Las corrientes que circulan por el rotor se ajustan por el fenómeno de inducción electromagnética y en esta máquina se fija la frecuencia de las corrientes en el estator  $\omega_e$ , se produce un campo electromagnético en el entrehierro de la máquina que gira mecánicamente con la frecuencia angular de estas corrientes. Como el rotor gira a velocidad mecánica  $\omega_m$ , los conductores del rotor cortan el campo magnético producido en el estator con una velocidad que es la diferencia entre  $\omega_e$  y  $\omega_m$ . La diferencia porcentual entre estas dos velocidades se conoce como deslizamiento de la máquina:

$$s = \frac{\omega_e - \omega_m}{\omega_e} \times 100 \quad (3.16)$$

La velocidad angular  $\omega_e$  se conoce como velocidad sincrónica de la máquina de inducción [Aller, 2007].

### 3.9 Conclusiones

Las máquinas eléctricas rotativas convencionales, presentan generalmente las siguientes características comunes:

1. Poseen un eje mecánico a través del cual se realiza el intercambio de energía.
2. Tienen una pieza estática o inmóvil denominada estator.
3. Disponen de una pieza móvil denominada rotor en el caso particular de las máquinas cilíndricas.
4. Generalmente son cilíndricas.
5. El flujo en el entrehierro de la máquina es periódico.

Los campos de cada eje de igual amplitud con desfase en el tiempo y en el espacio originan un campo magnético rotatorio, donde la frecuencia de giro del campo magnético en el espacio es igual a la frecuencia de variación de las corrientes en el tiempo.

Si la bobina  $\alpha$  no es idéntica a la bobina  $\beta$ , como se muestra en la Figura 3.6, o las corrientes inyectadas a la máquina en cada eje difieren en amplitud, el campo no es circular sino elíptico. Los campos elípticos también son considerados campos magnéticos rotatorios o rotantes.

La máquina eléctrica generalizada opera bajo los mismos principios característicos, determinando las matrices de resistencias  $[R]$ , inductancias en función del ángulo  $[L(\theta)]$ , así como la derivada con respecto al ángulo  $\theta$  de la matriz de inductancias, también denominada matriz de par  $[\tau(\theta)]$ . Donde las máquinas trifásicas también funcionan mediante el principio del campo magnético rotatorio.

## Capítulo 4

# Máquina polifásica de inducción

### 4.1 Introducción

El rotor de una máquina de inducción puede ser de dos tipos. Un rotor devanado se construye con un devanado similar al estator y con el mismo número de polos que el estator. Las terminales del devanado del rotor se conectan a anillos colectores aislados que están montados en la flecha. Las escobillas de carbón están montadas en estos anillos. Por otra parte el motor de inducción polifásico dispone de un rotor de jaula de ardilla con un devanado en forma de barras conductoras insertadas en ranuras en su rotor y conectadas en corto circuito en cada extremo mediante anillos conductores; por construcción en el caso de un motor de jaula de ardilla y de manera externa en el caso de un motor de rotor devanado. El flujo en el entrehierro rotatorio induce voltajes de frecuencia de deslizamiento en los devanados del rotor. Las corrientes en el rotor son determinadas por las magnitudes de los voltajes inducidos y la impedancia en el rotor a la frecuencia de deslizamiento. Al arranque el deslizamiento es unitario y la frecuencia del rotor es igual a la frecuencia en el estator. El campo producido por las corrientes del rotor gira a la misma velocidad que el campo del estator, y se produce un par de arranque que tiende a hacer girar el rotor en la dirección de la rotación del campo inductor del estator. Si este par es suficiente para vencer la oposición a la rotación creada por la carga a la flecha, el motor alcanzará su velocidad de operación. Donde la velocidad de operación nunca podrá ser igual a la velocidad síncrona, puesto que los conductores del rotor estarían inmóviles con respecto al campo del estator; no se induciría corriente en ellos y no se produciría ningún par [Fitzgerald et al, 2003].

### 4.2 Construcción de las máquinas polifásicas de inducción

El ensamblaje del devanado del estator y el núcleo laminado de la máquina polifásica de inducción es idéntico a la máquina polifásica síncrona. Para su máxima flexibilidad en la operación se emplea un rotor con un devanado polifásico distribuido, por lo general trifásico, conectado a terminales externas utilizando anillos deslizantes y escobillas. Los devanados del rotor suelen estar

internamente conectados en estrella o delta para reducir el número de anillos deslizantes necesarios. El circuito del rotor puede conectarse a una resistencia externa o a una fuente, para propósitos de control, o simplemente cortocircuitando para un funcionamiento normal asíncrono justo por debajo de la rapidez síncrona.

La solidez y el bajo costo de manufactura del rotor de jaula de aluminio fundido tienen que ver mucho con la popularidad del motor de inducción para accionadores industriales. El estator y el circuito de hierro del rotor están hechos de acero laminado para reducir las pérdidas por corrientes parásitas. Como es el caso de la componente de histéresis de la pérdida en el hierro del rotor, la pérdida por corriente parásita no es importante en condiciones normales de funcionamiento a bajo deslizamiento, dado que la frecuencia en el rotor es baja, las pérdidas en el hierro del estator son independientes del deslizamiento y constantes en el intervalo de funcionamiento de la máquina, cuando opera a un valor constante del flujo radial por polo.

#### 4.2.1 Representación del circuito del rotor

Dentro de las máquinas de inducción, se pueden encontrar dos tipos de rotor: 1) jaula de ardilla; 2) el de rotor devanado. El rotor tipo jaula de ardilla consiste en una serie de barras cortocircuitadas en sus extremos por dos anillos conductores, mostrados en la Figura 4.1a y su apariencia física es la que se muestra en la Figura 4.1b.

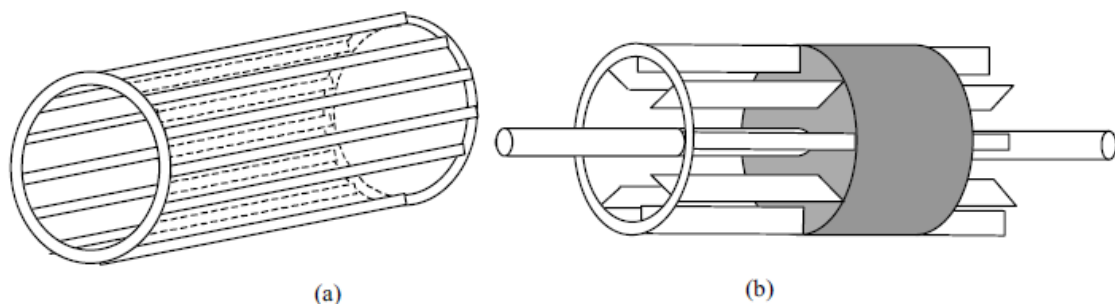


Figura 4.1 Rotor tipo jaula de ardilla a) Cortocircuitados en sus extremos,  
b) Apariencia física

Por su parte el rotor devanado es más complejo, los enrollamientos son similares a los del estator y conservan el mismo número de polos. Internamente las fases se encuentran conectadas en estrella y las terminales libres de las bobinas están conectadas a anillos rozantes montados en el eje de la máquina, mostrados en la Figura 4.2, la placa de terminales se conecta con los anillos mediante carbones, los aspectos

constructivos de este rotor hacen que la máquina pierda los atributos de simplicidad con respecto a la máquina con rotor tipo jaula de ardilla, el hecho de tener acceso a los anillos rozantes permite agregar resistencias a los enrollados para mejorar las condiciones del motor o bien controlar la potencia generada ante un cambio en la velocidad de giro del eje en el caso de la operación como generador [Vargas et al, 2003].

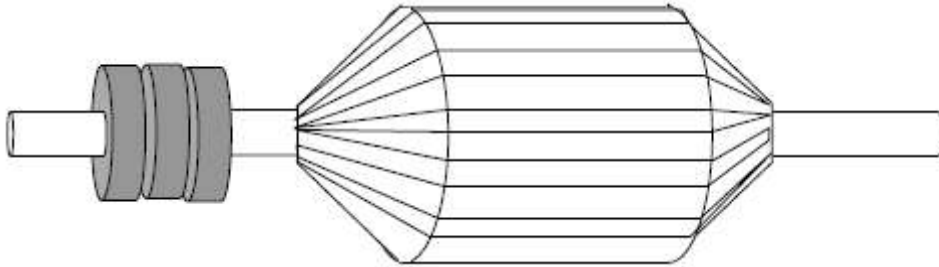


Figura 4.2 Rotor devanado

La fase de los devanados del rotor tiene una f.e.m. inducida a frecuencia de deslizamiento absorbida por la caída de voltaje a través de la impedancia, constituida por la resistencia y la reactancia de dispersión. Donde cada fase del rotor puede representarse con un circuito equivalente de la forma mostrada en la Figura 4.4 (a), en la que  $E_2$  y  $X_2$  corresponden a la f.e.m. inducida y a la reactancia de dispersión a  $s=1$ , cuando el rotor está en reposo. En el rotor jaula de ardilla con  $N$  conductores por par de polos habrá  $Np$  de tales circuitos, con las f.e.m. y las corrientes en circuitos separados  $360/N^\circ \varepsilon$  entre sí. Si el devanado del rotor se configura como trifásico, cada fase se diseñará en forma similar usando valores de circuito de fase  $X_2$  y  $R_2$  y un valor de  $E_2$  equivalente a la suma fasorial de la f.e.m. componente, tomando en cuenta la distribución de la frecuencia fundamental y los factores de paso del devanado. Las corrientes en cada grupo de conductores de fase del rotor estarán en fase entre sí. Pero mutuamente desplazadas en el tiempo un tercio del periodo de la frecuencia de deslizamiento, conforme a la f.e.m. de fase.

Conforme lo establece la Ecuación 4.1, el torque en watts sincrónicos es igual a la pérdida en el cobre del rotor, representada por  $I_2^2 R_2$ , dividida entre el deslizamiento  $s$  y multiplicada por el número de fases del rotor. Si el circuito equivalente de la fase del rotor se reemplaza por el de la Figura 4.3b, donde las impedancias aumentan de valor en el factor  $1/s$  lo mismo que la f.e.m. de la fuente, la corriente del rotor por fase  $I_2$  no

cambiará y se mantendrá el mismo efecto del campo magnético, pero la potencia real absorbida por la resistencia del circuito  $R_2/s$  representa ahora la contribución de la fase al par medido en watts sincrónicos. Ahora, la f.e.m. de la fuente  $E_2$  es independiente del deslizamiento y se relaciona con la densidad de flujo radial [Fitzgerald et al, 2003]. Donde la Figura 4.4, muestra la curva Par-velocidad de la máquina de inducción.

$$Par(Wsinc) = \frac{\text{pérdida total en el cobre del circuito (W)}}{\text{deslizamiento}} \quad (4.1)$$

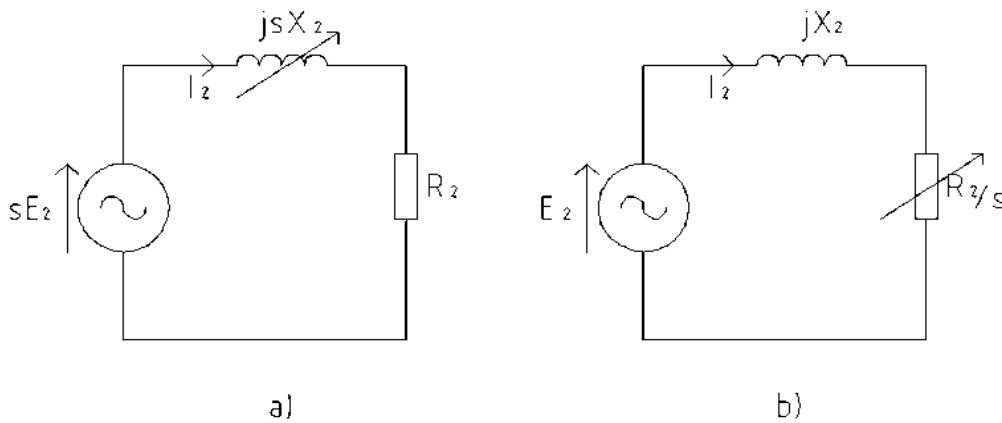


Figura 4.3 Circuitos equivalentes alternos a) y b) para el circuito del rotor de un motor polifásico de inducción con corriente del rotor invariable.

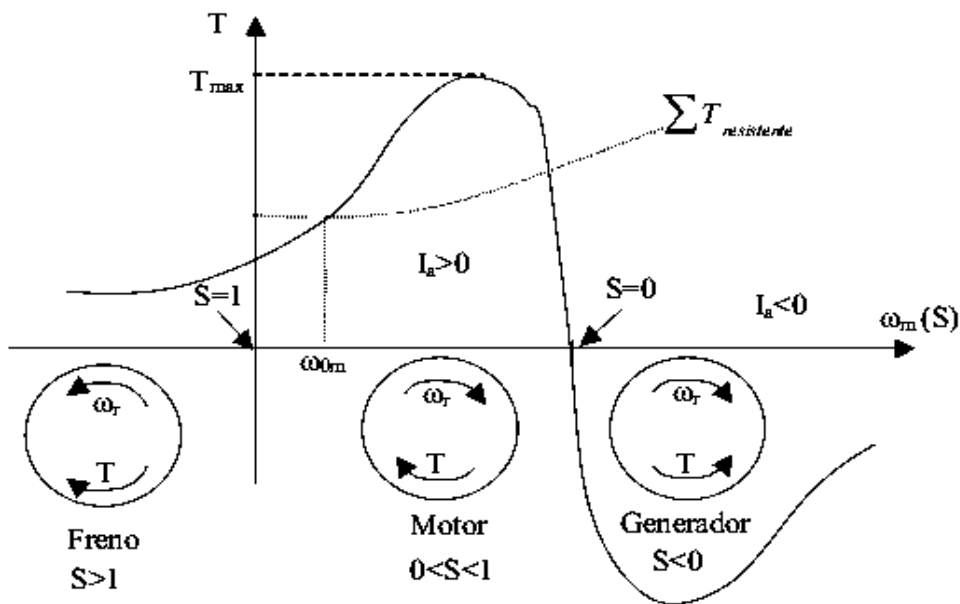


Figura 4.4 Curva Par-velocidad y regiones de operación de la máquina de inducción.



### 4.2.2 Representación del circuito del estator

#### Campo Magnético Rotatorio del estator

Un estator con 3 enrollados idénticos, ubicados a  $120^\circ$  y alineados con voltaje trifásico equilibrado, origina un campo magnético rotatorio de magnitud constante el cual gira a una velocidad ( $\omega_s$ ) constante, en cuyo caso, cada enrollamiento origina un flujo cuya magnitud varia sinusoidalmente en el tiempo y cuya dirección principal, coincide con el eje de enrollamiento, generándose para cada fase un fuerza magnetomotriz en el estator ( $F_e$ ), de acuerdo con la ley de ampere, esta dada por:

$$F_{ej} = N \cdot i_j; j: a, b, c \quad (4.2)$$

Donde la Figura 4.5, ejemplifica este fenómeno para la fase “a”.

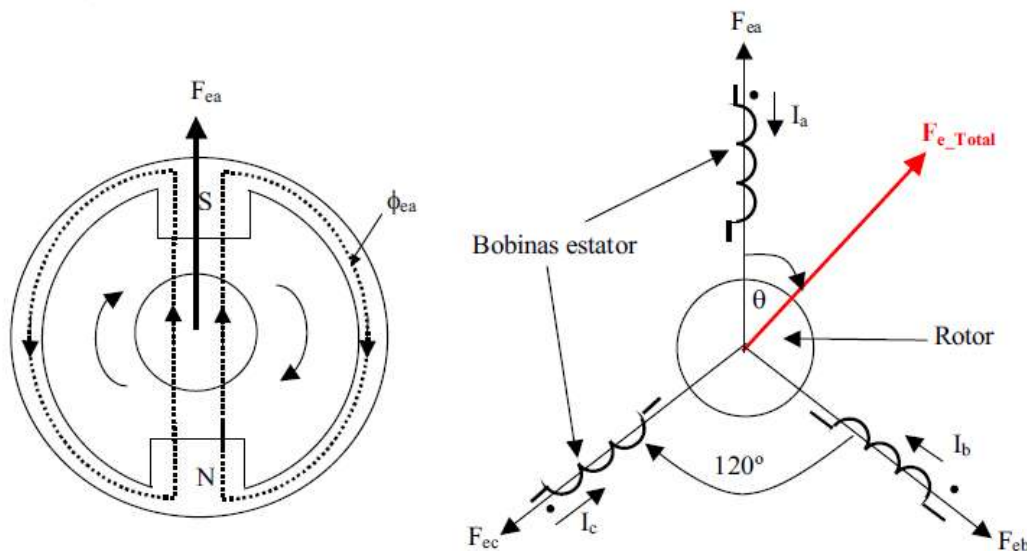


Figura 4.5 Motor de inducción de un par de polos, para la fase “a”

Las expresiones para las fuerzas generadas por fase, en un punto cualquiera del entrehierro, resulta:

$$\begin{aligned} F_{ea} &= N_{ia} \cdot \cos(\theta) \\ F_{eb} &= N_{ib} \cdot \cos(\theta - 120^\circ) \\ F_{ec} &= N_{ic} \cdot \cos(\theta - 240^\circ) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo que determina la posición donde están siendo calculadas las fuerzas magnetomotrices.

Si se define:

$$\begin{aligned} i_a &= I_{\max} \cdot \cos(\omega t) \\ i_b &= I_{\max} \cdot \cos(\omega t - 120^\circ) \\ i_c &= I_{\max} \cdot \cos(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Donde  $\omega = 2\pi f$  [rad/seg] es la frecuencia eléctrica de alimentación.

La fuerza magnetomotriz total, correspondiente a la suma de las fuerzas generadas por las fases “a”, “b” y “c”, es:

$$\begin{aligned} F_{e\_Total} &= F_m [\cos(\omega t) \cos(\theta) + \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) \\ &\quad + \cos(\omega t - 240^\circ) \cos(\theta - 240^\circ)] \end{aligned} \quad (4.5)$$

Donde la expresión anterior puede simplificarse en:

$$F_e = \frac{3}{2} F_m \cdot \cos(\omega t - \theta) \quad (4.6)$$

En efecto, en la posición determinada por el ángulo  $\theta$  ( $\theta$  constante) la resultante de la fuerza magnetomotriz del estator, es un vector cuya magnitud varía en forma sinusoidal en el tiempo, si se observa el comportamiento de la fuerza magnetomotriz máxima, es decir cuando  $\omega t - \theta = \pi/2$ , se establece que la onda  $F_e$  se mueve a velocidad  $\theta = \omega$ , la cual es denominada velocidad síncrona ( $\omega_s$ ).

Cuando el estator tiene un único par de polos (caso de la Figura 4.5) se tiene que  $s = F_e$ , sin embargo, al aumentar el número de polos, el aporte que realiza cada fase al campo magnético rotatorio corresponde a la suma de los aportes de cada par de polos como lo muestra la Figura 4.6.

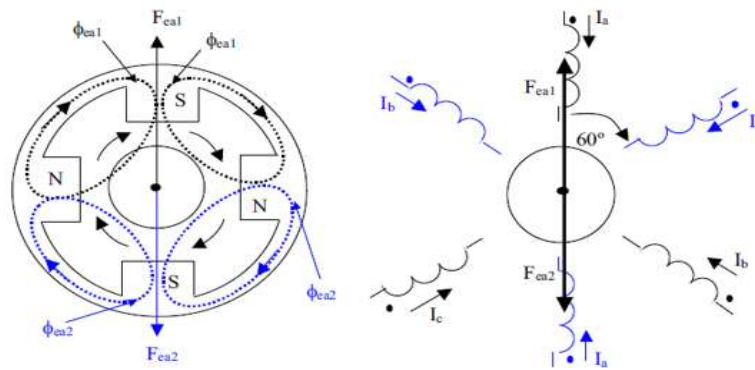


Figura 4.6 Motor de inducción con dos pares de polos

Desde el punto de vista del campo magnético rotatorio del estator, cuando se tiene un único par de polos, el recorrido entre Norte y Sur (que equivalen a  $180^\circ$  eléctricos ( $180^\circ$  eléctricos corresponden a los grados comprendidos entre un máximo y un mínimo)) corresponde a  $180^\circ$  geométricos, sin embargo, cuando existen dos pares de polos, estos mismos  $180^\circ$  eléctricos corresponden sólo a  $90^\circ$  geométricos como se muestra en la Figura 4.7.

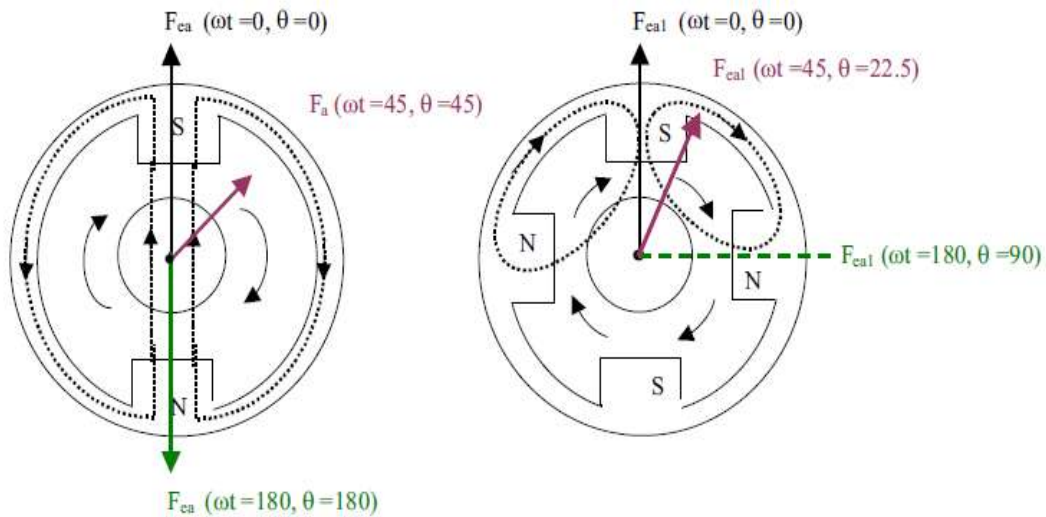


Figura 4.7 Grados eléctricos y geométricos según los pares de polos

### Características constructivas del estator

El estator de una máquina de inducción está compuesto por un núcleo laminado que permite reducir las pérdidas por corrientes parásitas que se inducen en él. Dentro de las configuraciones más usadas para disponer los enrollados del estator se encuentra el enrollado imbricado que se muestra en la Figura 4.8. En el diagrama de la Figura 4.8a, se muestra la conexión entre las bobinas de un enrollado (bobina 1, bobina 2 y bobina 3) y la disposición física de éstas en las ranuras axiales del núcleo. La Figura 4.8b muestra el esquema de conexión por fase (fase “a”) y el sentido de la corriente de alimentación para el caso de un estator con dos pares de polos.

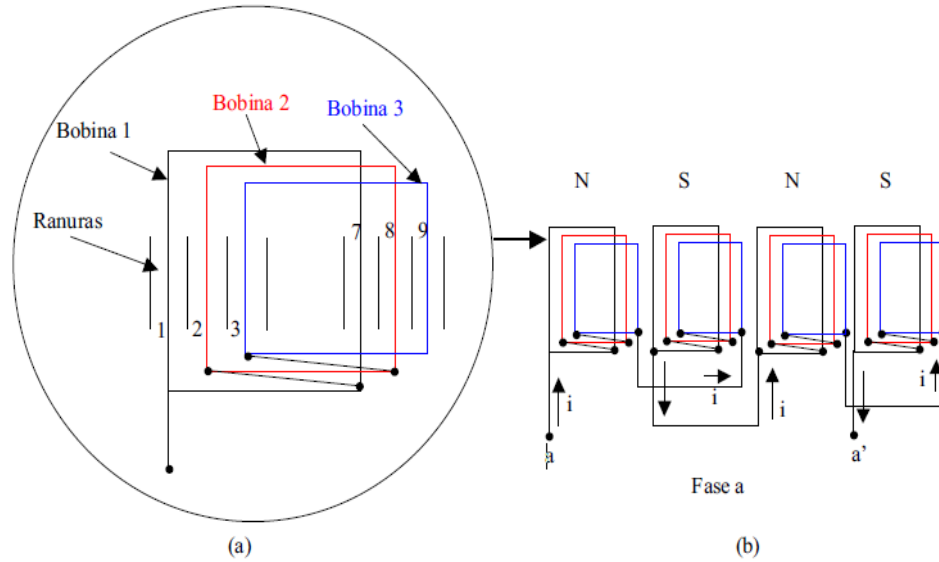


Figura 4.8 Estator con enrollado tipo imbricado

Si consideramos que el estator tiene un total de 24 ranuras, entonces cada paso polar abarcará 6 ranuras, sin embargo, el ancho de cada bobina mostrada en la Figura 4.8 es en realidad de 5 ranuras razón por la cual este tipo de enrollado se denomina de “paso acortado”, además puesto que los polos están conformados por más de una bobina se dice que el enrollado es “distribuido”.

Los enrollados de las fases restantes (fases “b” y “c”) son idénticos a la fase “a” y se ubican a  $120^\circ$  y  $240^\circ$  grados eléctricos respectivamente. Esto significa que, dado que un par de polos contiene 12 ranuras ( $360^\circ$  eléctricos), si la bobina 1 de la fase “a” está alojada en la ranura 1, entonces la bobina 1 de la fase “b” se alojará en la ranura 5 ( $120^\circ$  eléctricos) y la bobina 1 de la fase “c” estará en la ranura 9 ( $240^\circ$  eléctricos). Los extremos de las bobinas del estator se encuentran conectados a la placa de terminales ubicada en la carcasa de la máquina, de este modo los bornes son accesibles para elegir entre una conexión delta o estrella de los enrollados [Vargas et al, 2003].

En la Figura 4.9, se representa el circuito equivalente de una fase del devanado del estator de la máquina de inducción donde  $R_l$  y  $X_l$  son la resistencia y la reactancia de dispersión por fase y  $E_l$  la f.e.m. efectiva por fase, debida a la sumatoria de las f.e.m. inducidas en los conductores por fase individuales del estator por el flujo radial rotatorio del entrehierro. Por tanto, el efecto magnético de la corriente del rotor en el campo radial es tal que debido a la corriente del estator, modifique su magnitud y

posición, de forma que el campo radial resultante no cambie, conservando su movimiento sincrónico relativo a los conductores del estator.

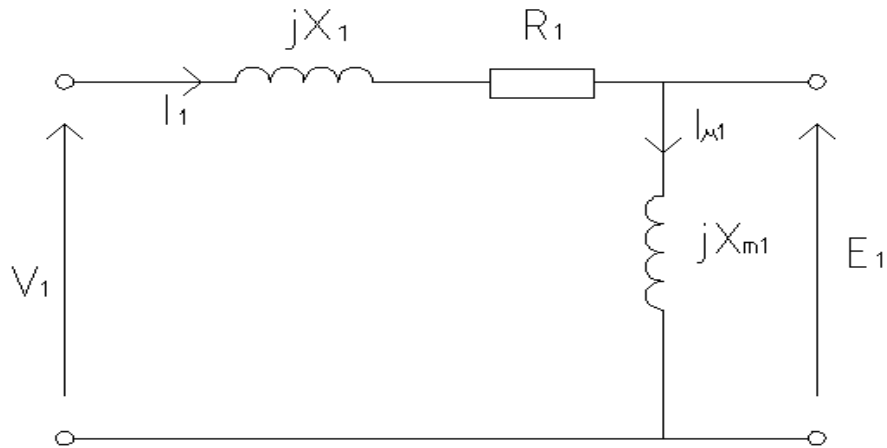


Figura 4.9 Circuito equivalente (primario) del estator de un motor polifásico de inducción

Los devanados de fase del estator tienen que portar componentes adicionales de corriente que generan una componente radial resultante que gira en sincronía y balancea con precisión, en magnitud y posición, al campo radial de las corrientes del rotor. Este campo compensador aparece como  $-H_{nr}$  en el diagrama espacio-fasorial de la Figura 4.10(a), Es evidente que las relaciones de magnitud y espacio-fase entre  $H_n$  y  $-H_{nr}$  deben ser idénticas a las relaciones de magnitud y tiempo-fase entre  $I_{\mu 1}$  y  $-I'_2$  en el diagrama tiempo fasorial de la Figura 4.10(b), donde  $-I'_2$  es la corriente adicional del estator necesaria en una fase para generar la componente del campo compensador necesario [Gray, 1997].

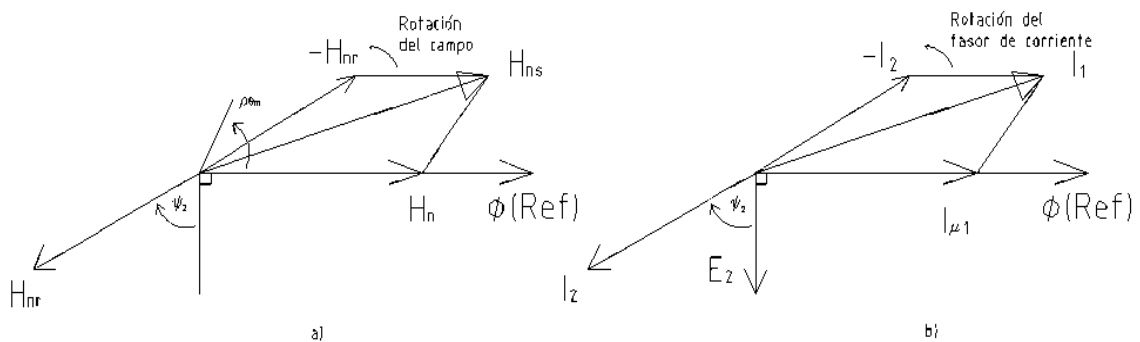


Figura 4.10 Diagrama a) espacio-fasorial, b) tiempo-fasorial de un motor polifásico de inducción relacionados de tal forma que el flujo radial por polo resultante  $\Phi$  se identifica con la corriente magnetizante de la fase de referencia del estator

### 4.3 Deslizamiento

El voltaje inducido en una barra del rotor de un motor de inducción depende de la velocidad del rotor con respecto a los campos magnéticos. Al definir el movimiento entre el rotor y los campos magnéticos, uno de ellos es la velocidad de deslizamiento, definida como la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor:

El deslizamiento del rotor está definido como:

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (4.7)$$

La velocidad sincrónica del motor es:

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120f}{p} \quad (4.8)$$

La velocidad del rotor del motor está dada por:

$$n_m = (1 - s)n_{\text{sinc}} \quad (4.9)$$

La ecuación también puede expresarse en términos de la velocidad angular  $\omega$  (radianes por segundo) de los campos magnéticos rotatorios del rotor y estator:

$$s = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} = 1 - \frac{\omega_m}{\omega_s} \quad (4.10)$$

Visto desde el punto de vista eléctrico, el deslizamiento permite establecer una relación entre la frecuencia de las corrientes de alimentación y las corrientes inducidas en el rotor, de este modo:

$$f_r = s \cdot f \quad (4.11)$$

Donde:

$f_r$  Es la frecuencia de las corrientes rotóricas.

$f$  Es la frecuencia de las corrientes de alimentación del estator.

En general, el deslizamiento es un parámetro que permite caracterizar la operación de la máquina de inducción. Donde, la máquina actúa como motor (la energía

de la fuente que alimenta al estator se transfiere al eje) sólo si la velocidad angular del rotor es menor a la velocidad sincrónica ( $s < 1$ ), en cambio si la velocidad mecánica del rotor es mayor a  $\omega_s$ , lo que equivale a decir que el deslizamiento es menor que 0, entonces la máquina se encuentra operando como generador y finalmente, si el deslizamiento es mayor a 1 (lo que implica  $\omega_m$  negativo) indica que la máquina está actuando como freno.

#### 4.4 Análisis del circuito equivalente

El circuito monofásico equivalente de la Figura 4.11, puede utilizarse con una amplia variedad de características del desempeño de la máquina de inducción polifásicas en condiciones de estado estable. En estas se pueden determinar variaciones de voltaje, velocidad y pérdidas a medida que cambian los requerimientos de carga-par de torsión, par de arranque y el par máximo.

El circuito equivalente muestra que la potencia total  $P_{entrehierro}$  transferida a través del entrehierro proveniente del estator es:

$$P_{entrehierro} = n_{ph} I_2^2 \left( \frac{R_2}{s} \right) \quad (4.12)$$

Donde:

$n_{ph}$  Número de fases del estator

La pérdida total equivalente en el rotor  $I^2 R$ , es:

$$P_{rotor} = n_{ph} I_{2s}^2 R_2 \quad (4.13)$$

Considerando  $I_{2s} = I_2$ , la Ecuación 4.13 se escribe como:

$$P_{rotor} = n_{ph} I_2^2 R_2 \quad (4.14)$$

La potencia electromagnética  $P_{mec}$  desarrollada por el motor, puede determinarse al restar la disipación de potencia en el rotor de la Ecuación 4.14 de la potencia a través del entrehierro de la Ecuación 4.12.

$$P_{mec} = P_{entrehierro} - P_{motor} = n_{ph} I_2^2 \left( \frac{R_2}{s} \right) - n_{ph} I_2^2 R_2 \quad (4.15)$$

O de manera equivalente:

$$P_{mec} = n_{ph} I_2^2 R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \quad (4.16)$$

Comparando la Ecuación 4.12 con la Ecuación 4.16 se obtiene:

$$P_{mec} = (1-s)P_{entrehierro} \quad (4.17)$$

Y

$$P_{rotor} = sP_{entrehierro} \quad (4.18)$$

La fracción  $(1-s)$  se transforma en potencia mecánica y  $s$  se disipa como pérdida en los conductores del rotor, en donde el deslizamiento elevado es un dispositivo ineficiente. La Figura 4.11 resalta los aspectos de potencia electromecánica por fase del estator y es igual a la potencia suministrada a la resistencia  $R_2 (1-s)/s$ .

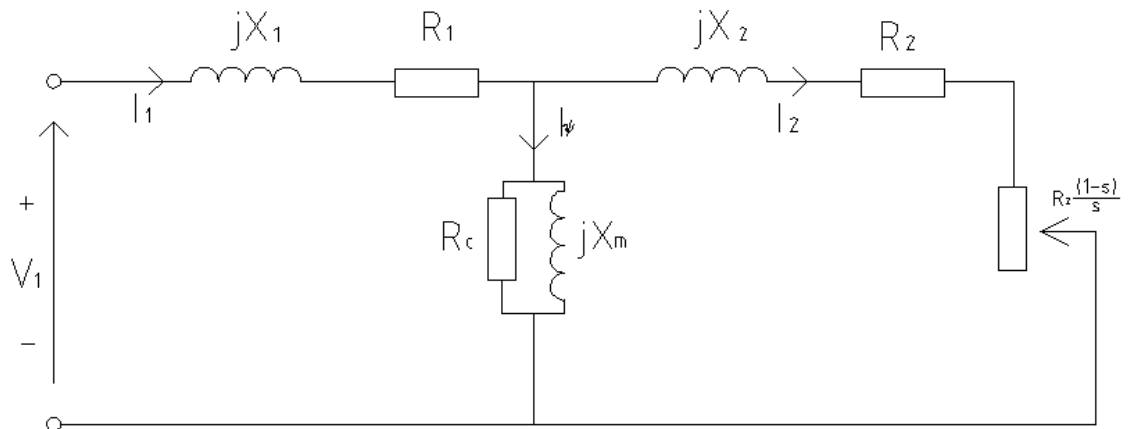


Figura 4.11 Forma alternativa de circuito equivalente

El  $T_{mec}$  electromecánico a la potencia  $P_{mec}$  se obtiene recordando que la potencia mecánica es igual al par por la velocidad angular:

$$P_{mec} = \omega_m T_{mec} = (1-s)\omega_s T_{mec} \quad (4.19)$$

Donde se encuentran representadas:



$P_{mec}$  En Watts

$\omega_s$  En rad/seg

$T_{mec}$  En Newton metros

Las Ecuaciones 4.16 y 4.17 conducen a:

$$T_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega_m} = \frac{P_{entrehierro}}{\omega} = \frac{n_{ph} I_2^2 (R_2 / s)}{\omega_s} \quad (4.20)$$

Como la carga en el eje es función del deslizamiento S, se tiene que:

- Cuando el motor está en vacío:  $R_2 \frac{(1-s)}{s} \rightarrow \infty$  por lo cual  $S \rightarrow 0$  y  $\omega_r = \omega_s$ .
- Cuando el motor está detenido:  $R_2 \frac{(1-s)}{s} \rightarrow 0$  por lo cual  $S \rightarrow 1$  y  $\omega_r = 0$ .

Con la velocidad angular mecánica síncrona  $\omega_s$  dada por:

$$\omega_s = \frac{4\pi f_e}{\text{polos}} = \left( \frac{2}{\text{polos}} \right) \omega_e \quad (4.21)$$

El par mecánico  $T_{mec}$  y la potencia  $P_{mec}$  no son los valores de salida en la flecha porque es necesario tomar en cuenta las pérdidas por fricción, el devanado y las cargas parásitas. Donde es correcto restar las pérdidas por fricción, el rozamiento con el aire y otras pérdidas rotatorias de  $T_{mec}$  o  $P_{mec}$  y los efectos de las cargas parásitas pueden restarse de la misma manera. El resto es trabajo útil como potencia de salida de la flecha, por lo tanto:

$$P_{flecha} = P_{mec} - P_{rot} \quad (4.22)$$

Y

$$T_{flecha} = \frac{T_{flecha}}{\omega_m} = T_{mec} - T_{rot} \quad (4.23)$$

Donde  $P_{rot}$  y  $T_{rot}$  son la potencia y el par asociados con las pérdidas por fricción, rozamiento en el aire y otras pérdidas rotatorias restantes. Y la eficiencia  $\eta$  de la máquina es igual a:

$$\eta = \frac{P_{flecha}}{P_{ent}} \quad (4.24)$$

#### 4.4.1 Punto de operación

Tal como muestra la Figura 4.4, cuando la máquina opera como motor de inducción, se tiene que el punto de operación de equilibrio frente a una determinada carga en el eje ( $\omega_{0m}$ ), corresponde a aquel punto donde el torque generado por la máquina se iguala la suma de los torques resistentes ( $T_{mec} = T_r$ ).

En efecto, visto desde un punto de vista, la partida o cualquier otro cambio en las referencias de velocidad o carga mecánica en torno a un punto de operación, produce un torque acelerante dado por:

$$T_{ac} = T_{mec}(s) - T_r(s) \quad (4.25)$$

Donde:

$T_{ac}$  es el torque acelerante.

$T_r$  es el torque resistente.

Este torque corresponde a un torque que desaparece una vez que se llega a régimen permanente, definiendo un nuevo punto de operación donde los torques resistente y generado son idénticos ( $\omega_{0m}$ ).

Visto desde un punto de vista mecánico, la Ecuación 4.25, puede igualarse a:

$$T_{ac} = j \frac{\partial \omega_m}{\partial t} = j \frac{\partial (1-s)\omega_s}{\partial t} = -j\omega_s \frac{\partial s}{\partial t} \quad (4.26)$$

Donde:

$J$  es la inercia del motor

La ecuación 4.26 indica que si el cambio en las referencias generan un torque acelerante positivo, entonces la nueva velocidad de giro ( $\omega_m$ ) será mayor a la actual, en cambio si el torque acelerante es negativo la máquina se estabilizará en una velocidad menor respecto al caso original.

Por otra parte, el hecho que el motor tenga asociada una inercia implica que el cambio en el punto de operación) no es instantáneo, lo que se traduce en que, dado que la velocidad síncrona no varía, el deslizamiento sea el que determine la velocidad de respuesta del motor ( $s = s(t)$ ).

## 4.5 Determinación de parámetros de la máquina de inducción

### 4.5.1 Prueba de vacío

La prueba en vacío (sin carga mecánica en el eje) permite determinar la rama paralela del estator en el circuito equivalente de la máquina de inducción. Esta prueba se realiza a frecuencia nominal y con voltajes polifásicos balanceados aplicados a las terminales del estator, dado que la impedancia paralela es grande, la corriente circulante durante la prueba es más bien pequeña, con lo cual es válido omitir la rama serie del estator como se muestra en la Figura 4.12. Además se toman lecturas a voltaje nominal después de que el motor estando funcionando durante un tiempo largo para que los cojinetes se lubriquen de forma adecuada y se obtendrán las siguientes mediciones:

$V_{l, nl}$  = Voltaje de línea a neutro [V]

$I_{l, nl}$  = Corriente de línea [A]

$P_{nl}$  = Potencia de estrada eléctrica polifásica total [W]

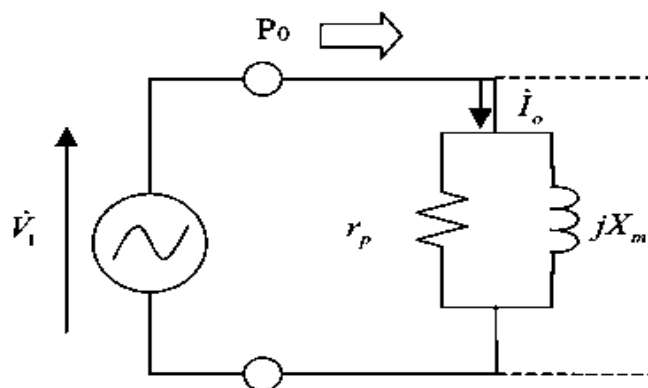


Figura 4.12 Prueba en vacío

En máquinas polifásicas es común medir el voltaje de línea a línea, por lo tanto, el voltaje de fase a neutro debe ser calculado (dividiendo entre  $\sqrt{3}$  en el caso de una máquina trifásica).

Sin carga, la corriente del rotor es un valor pequeño pero necesario para producir un par suficiente para vencer las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire asociadas con la rotación. Por lo tanto, la pérdida en el rotor sin carga  $I^2R$  es insignificante. Si se ignoran las pérdidas  $I^2R$  en el rotor, la pérdida rotatoria  $P_{rot}$  en condiciones normales de operación se puede determinar restando las pérdidas  $I^2R$  en el estator de la potencia de entrada sin carga:

$$P_{rot} = P_{nl} - n_{ph} I_{1,nl}^2 R_1 \quad (4.25)$$

La pérdida rotatoria total a frecuencia y voltaje nominales bajo carga se considera constante e igual a su valor sin carga. Donde la resistencia  $R_1$  varía con respecto a la temperatura y se deberá tener cuidado al aplicar la Ecuación 4.25. Si el motor funciona sin carga a su velocidad nominal y se desconecta de manera repentina del suministro de corriente, la reducción de velocidad del motor será determinada por las pérdidas rotacionales como:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = -T_{rot} = -\frac{P_{rot}}{\omega_m} \quad (4.26)$$

Ahora, si se conoce la inercia  $J$  del rotor, es posible determinar las pérdidas rotacionales a cualquier velocidad  $\omega_m$  a partir de la reducción de velocidad resultante como:

$$P_{rot}(\omega_m) = -\omega_m J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4.27)$$

Por lo tanto, las pérdidas rotacionales a velocidad nominal se pueden determinar, cuando el motor primero se desconecta cuando funciona a velocidad nominal. Aplicando lo anterior, la pérdida en el núcleo se establece como:

$$P_{núcleo} = P_{nl} - P_{rot} - n_{ph} I_{1,nl}^2 R_1 \quad (4.28)$$

En condiciones de vacío, la corriente del estator es baja y se puede ignorar la caída de voltaje a través de la resistencia del estator y la reactancia de dispersión. La pérdida en el núcleo de la resistencia se determina como [Fitzgerald et al, 2003]:

$$R_c = \frac{n_{ph} V_{1,n1}^2}{P_{núcleo}} \quad (4.29)$$

#### 4.5.2 Prueba de rotor bloqueado

La prueba de rotor bloqueado es análoga a la prueba de cortocircuito del transformador, es decir, permite encontrar los parámetros de la rama serie de la máquina de inducción. Para ello se procede a detener (mediante una fuerza externa) el rotor de la máquina de modo que el deslizamiento sea unitario y la ecuación de la carga tienda a cero. Como lo muestra la Figura 4.13.

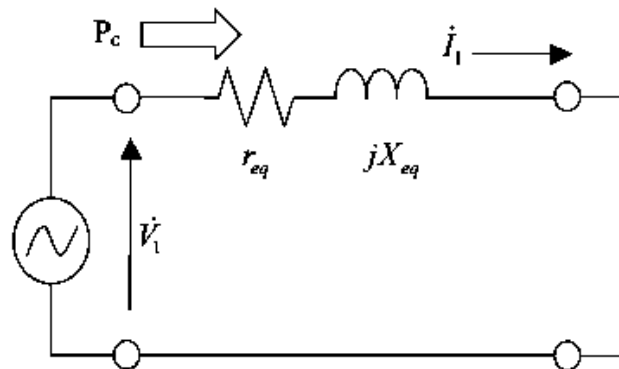


Figura 4.13 Prueba de corto circuito

En este caso, la prueba debe efectuarse a voltaje  $V_1$  reducido, de modo que la corriente  $I_1$  sea la corriente nominal (para no dañar los enrollados). Esto implica que las pérdidas en la rama paralela pueden despreciarse obteniendo directamente los valores de la rama serie. De acuerdo con la Figura 4.13, la rama serie, mediante los valores  $r_{eq}$  y  $X_{eq}$ , representan los valores de estator y rotor según las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} r_{eq} &= r_e + r_r' \\ X_{eq} &= X_e + X_r' \end{aligned} \quad (4.30)$$

Al igual que en el caso anterior, las mediciones obtenidas en la prueba son el voltaje aplicado al estator ( $V_1$ ), la corriente circulante ( $I_1$ ) y la potencia activa ( $P_c$ ).

Así, los parámetros quedan dados por:

$$r_{eq} = \frac{P_c}{I_1^2} \quad (4.31)$$

$$X_{eq} = \frac{Q_c}{I_1^2} \quad (4.32)$$

Con:

$$Q_c = \sqrt{(V_1 I_1)^2 - P_c^2} \quad (4.33)$$

## 4.6 Pérdidas y diagramas de flujo de potencia

Un motor de inducción se describe como un transformador rotante. Los devanados secundarios de un motor de inducción (el rotor) están cortocircuitados de tal forma que no existe salida eléctrica, sino mecánica. La potencia de entrada al motor de inducción  $P_m$  se presenta en forma de voltajes y corrientes eléctricas trifásicas. Las primeras pérdidas en la máquina son  $I^2 R$  en los devanados del estator (pérdidas en el cobre). Luego, alguna cantidad de potencia se pierde por histéresis y por corrientes parasitas en el estator. La potencia remanente en este punto se transfiere al rotor de la máquina a través del entrehierro. Después que la potencia ha sido transferida al rotor, algo de ella se disipa como pérdidas  $I^2 R$  (en el cobre del rotor) y el restante se convierte de potencia eléctrica en mecánica. Por ultimo, las pérdidas por rozamiento propio y por rozamiento en el aire.

Puesto que el motor de inducción opera normalmente a una velocidad cercana a la velocidad síncrona, el movimiento de los campos magnéticos sobre la superficie del rotor es muy lento y las pérdidas en el núcleo del rotor son muy pequeñas comparadas con las pérdidas en el núcleo del estator. Estas pérdidas se representan en el circuito equivalentes del motor de inducción por una resistencia  $R_c$ . Cuanto mayor sea la velocidad de un motor de inducción, mayor es su rozamiento propio y con el aire. Por otra parte, cuanto mayor sea la velocidad del motor, menores serán sus pérdidas en el núcleo. A veces estas clases de pérdidas se agrupan y se denominan pérdidas rotacionales. Con frecuencia las pérdidas rotacionales de un motor se consideran constantes frente a la velocidad variable debido a que las pérdidas cambian en dirección opuesta al cambio de velocidad

## 4.7 Acción generatriz de inducción

Los generadores asíncronos se utilizan generalmente conectados a grandes redes en las que su potencia representa un porcentaje insignificante de la carga del sistema. De la red extraen su corriente de excitación y absorben la potencia reactiva necesaria para su propia magnetización. Cuando actúan de forma aislada, esta energía reactiva puede compensarse mediante bancos de capacitores. A menos que se les conecte estos bancos los generadores de inducción no pueden generar corriente cuando están desconectados de la red, ya que son incapaces de suministrar su propia corriente de excitación.

El generador asíncrono presenta la ventaja de no necesitar excitatriz, lo que simplifica el equipo. Sin embargo presentan el fenómeno conocido como deslizamiento lo que provoca que la eficiencia de un generador de inducción sea de 2% a un 4% inferior al de los generadores síncronos.

### 4.7.1 Circuito equivalente del generador de inducción

El circuito equivalente de un generador de inducción, es similar al circuito equivalente de un transformador, donde el devanado del circuito del rotor opera a una frecuencia variable debido al deslizamiento de la máquina; esta consideración importante, permite que la impedancia del circuito del rotor, vista por el estator de la máquina, varíe en función del deslizamiento, en la Figura 4.14, se muestra el circuito equivalente por fase de una máquina trifásica de inducción; donde todos los parámetros por fase, están referidos al estator de la máquina.

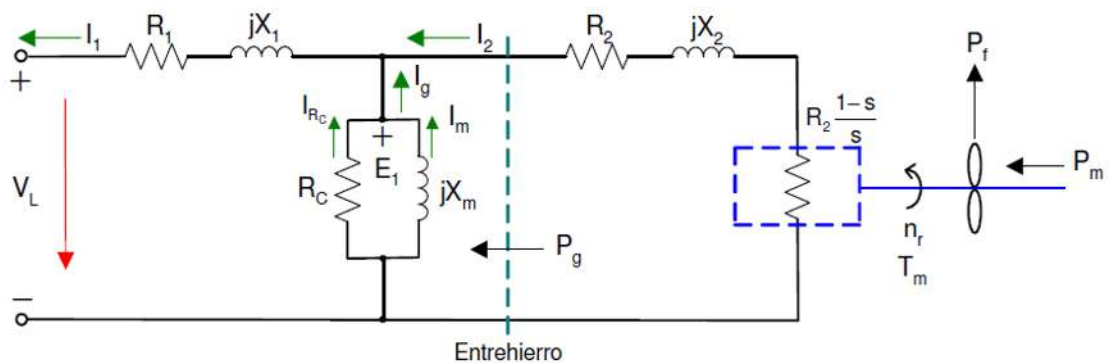


Figura 4.14 Circuito equivalente del generador de inducción.

Donde:

$R_1, R_2$  -Resistencias de los devanados del estator y rotor por fase

$X_1, X_2$  -Reactancias de dispersión del devanado del estator y rotor por fase

$X_m$  Reactancia de magnetización por fase

$R_c$  Resistencia de pérdida en el entrehierro

$E_1$  Voltaje en el entrehierro por fase

$V_L$  Voltaje terminal por fase

$I_1, I_2$  Corrientes en los devanados del estator y rotor por fase

$I_g = I_{Rc} + I_m$  -Corriente en el entrehierro de la máquina

$P_f$  Potencia de pérdidas por fricción por fase

$P_g$  Potencia promedio que cruza el entrehierro por fase

$P_m$  Potencia mecánica de entrada por fase

$T_m$  Torque mecánico de entrada por fase

$n_r$  Velocidad del rotor.

El funcionamiento de la máquina de inducción como generador, al girar el rotor de la máquina, con alguna fuente de potencia reactiva conectada a los devanados de su estator a una velocidad mayor que su velocidad sincrónica nominal, su deslizamiento de operación es negativa, y la fuerza electromotriz en el devanado del rotor varía su dirección con respecto al funcionamiento como motor, variando también la dirección de las componentes activas  $I_1$  e  $I_2$ ; permitiendo que la máquina ceda potencia hacia la carga o a la red a la que se encuentra conectada.

#### 4.7.2 Circuito equivalente del generador de inducción autoexcitado

Para que la máquina de inducción funcione como generador, debe haber un campo magnético que interactúe con los conductores del estator y se induzca una fuerza electromotriz de frecuencia variable en función del deslizamiento.

Despreciando las pérdidas resistivas en el entrehierro de la máquina; el circuito equivalente por fase del generador de inducción autoexcitado, donde todos los parámetros están referidos al estator de la máquina y a la frecuencia de operación, se muestra en la Figura 4.15.



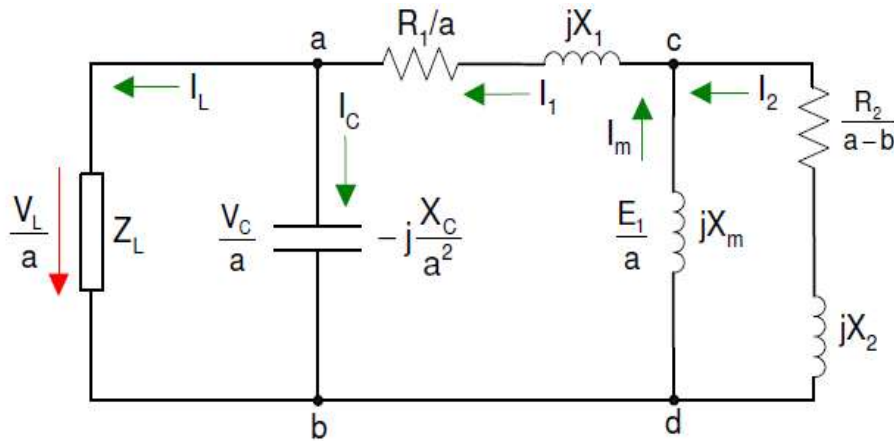


Figura 4.15 Circuito equivalente del generador de inducción autoexcitado.

Donde:

$$a = \frac{f_s}{f_b} \text{-Frecuencia en pu}$$

$$b = \frac{n_r}{n_b} \text{-Velocidad en pu}$$

$f_b$  Frecuencia base

$n_b$  Velocidad base

$Z_L$  Impedancia de carga por fase.

$X_C$  Reactancia capacitiva de excitación por fase.

$E_1/a$  Voltaje en el entrehierro por fase a la frecuencia "a"

$V_L/a$  Voltaje terminal en la carga por fase a la frecuencia "a"

$V_C/a$  Voltaje en el capacitor de excitación por fase a la frecuencia "a".

$I_C, I_L$  Corriente en el capacitor de excitación y corriente en la carga por Fase.

La autoexcitación es el proceso electromagnético por el cual aparece un voltaje en el entrehierro de la máquina, cuando el rotor de la máquina empieza a girar, el flujo remanente induce en las bobinas del estator una fuerza electromotriz inicial, la cual hace circular por el capacitor de excitación una pequeña corriente, esta corriente circula por los devanados del estator fortaleciendo el campo magnético y la fuerza electromotriz  $E_1$ . En el proceso de autoexcitación la fuerza electromotriz inducida y la corriente en los devanados del estator, se obtienen por medio de la influencia de la saturación magnética de la máquina, hasta alcanzar un estado estable de operación.

Con el fin de disminuir la necesidad de reactivos, el proceso de autoexcitación se inicia operando al generador autoinducido sin carga; pero si en este proceso de autoinducción el requerimiento de reactivos es demasiado alto, los capacitores de excitación del generador autoexcitado no podrán proporcionar la excitación necesaria para la existencia de voltajes y corrientes en el estator de la máquina.

#### **4.7.3 Motor de inducción como generador**

La teoría establece que cualquier generador se puede utilizar como motor y viceversa. Es una alternativa viable entonces tomar un motor común de inducción para la generación de electricidad. Sin embargo se debe tomar en cuenta dos consideraciones fundamentales:

1. Se debe llevar el motor a girar más rápidamente que su velocidad nominal (dada en rpm) para vencer el deslizamiento de la máquina.
2. Cuando se va a arrancar la unidad, hay que excitar las bobinas con un pulso de corriente DC de manera que éste pueda girar, la cual es la encargada de brindar este pulso a la máquina de inducción para el arranque, también se muestra el banco de capacitores, los cuales después del arranque le brindan la potencia reactiva a la máquina de inducción para poder funcionar.

#### **Ventajas y desventajas del generador de inducción**

A pesar de todo el uso de motores como generadores proporciona ciertas ventajas entre las que se encuentran:

- Se consiguen fácilmente en el mercado local.
- Se puede adquirir en el mercado por menos costo que su equivalente síncrono.
- Los motores de inducción son robustos y tienen una construcción simple, no tiene escobillas que se desgasten ni anillos deslizantes en su rotor.
- Las máquinas de inducción son completamente cerradas, de modo que aseguran la protección contra el polvo y el agua.
- Los motores de inducción se pueden obtener en un amplio rango de potencias para el trabajo en sistemas aislados.

Y entre sus desventajas se pueden mencionar:

- No siempre están disponibles con los rangos de voltaje adecuados para ser útiles como generadores, por lo que podría ser necesario hacer modificaciones en la conexión de los devanados o, en casos muy extremos, rebobinar.
- A diferencia del generador síncrono, que puede ser suministrado listo para su uso, la máquina de inducción no trabajará si no se le conecta un banco de condensadores de un valor adecuado a calcular. Esto permite que inicie la generación de energía.

La tabla 4.1, muestra una comparación del generador síncrono y el generador de inducción tipo jaula de ardilla, caracterizando la estructura del rotor, excitación, señal generada y costos.

Tabla 4.1 Tabla comparativa entre un generador de inducción y un generador síncrono.

<b>TABLA DE COMPARACIÓN</b>	
<b>GENERADOR DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA</b>	<b>GENERADOR SÍNCRÓNICO</b>
<b>ESTRUCTURA DEL ROTOR</b>	
Barras de cobre no aisladas.	Cable o barras aisladas.
Relativamente pocos conductores.	Bobinado con muchas vueltas.
Devanados rígidos alojados en las ranuras.	Alto desgaste en los polos salientes.
Pocas pero grandes conexiones soldadas.	Muchas pequeñas conexiones.
Pocos componentes básicos.	Muchos componentes básicos.
<b>EXCITACIÓN</b>	
Consume potencia reactiva.	Genera potencia reactiva (excelente regulador de reactiva)
Requiere una fuente de reactivos externa.	Necesidad de un medio de excitación de corriente continua.
No existen ni las escobillas, ni los anillos rozantes.	Escobillas, anillos rozantes o imanes permanentes.
<b>SEÑAL GENERADA</b>	
Tendencia a amortiguar los armónicos en la señal del sistema.	Tendencia a generar armónicos debido a la reacción de inducido en carga.
Poco control de voltaje y frecuencia.	Efectúa control de voltaje y frecuencia.
Pérdida de estabilidad.	Pérdida de estabilidad y sincronismo.
<b>GENERADOR DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA</b>	<b>GENERADOR SÍNCRÓNICO</b>
Conexión sencilla cuando se lo conecta a la red arrancándolo como motor.	Requiere un complejo equipamiento para el control y sincronización.
<b>COSTOS</b>	
Bajo.	Alto.
No requiere la presencia de personal en la instalación.	Se requiere personal en operación.
Bajo mantenimiento.	Mantenimiento regular de las escobillas.
Eficiencia ligeramente baja.	Alta eficiencia.
Factor de potencia en retraso.	Factor de potencia en adelanto.

En la tabla 4.2 se puede observar la eficiencia en función de la potencia del motor de Inducción trifásico tipo NEMA B.16.

Tabla 4.2 Eficiencia para un motor de inducción trifásico tipo NEMA B.16

Potencia (kW)	Potencia (Hp)	Rango de eficiencia nominal (%)	Eficiencia nominal promedio (%)
3.73	5	78 - 85	82
7.46	10	81 - 88	85
18.65	25	85 - 90	88
37.3	50	88 - 92	90
55.95	75	89.5 - 92.5	91
74.6	100	90 - 93.5	91.5
111.9	150	90 - 93	92.5
149.2	200	91.5 - 94	93
186.5	250	91.5 - 94.5	93.5

Las direcciones de referencia para las variables eléctricas de corriente y voltaje son las adoptadas por el transformador, como en el transformador estático, el flujo de potencia de la máquina de inducción es básicamente reversible. La acción generatriz de deslizamiento  $s$  tiene valor negativo. La representación efectiva de la carga mecánica  $R'_2/s$  se convierte en resistencia negativa y en una fuente de potencia. Sin embargo, los elementos de la reactancia inductiva del circuito equivalente, demuestran que la máquina de inducción con circuito cerrado del rotor siempre absorbe volts-amperes reactivos. En la práctica, los generadores de inducción se limitan a aplicaciones donde el voltaje y frecuencia en terminales del estator se definen por una red de potencia de baja impedancia, capaz de llenar los requisitos de volts-amperes reactivos. La regeneración proporciona un torque de frenado para la carga de un motor de inducción que rebase la rapidez. Donde las turbinas eólicas ofrecen la perspectiva de una operación generadora más continua [Gray, 1997].

## 4.8 Conclusiones

En este capítulo se concluyen las siguientes características de la máquina de inducción polifásica:

- En un motor de inducción polifásica las corrientes a frecuencia de deslizamiento son inducidas en los devanados del rotor, conforme se desliza el flujo que pasa a través del estator que gira de manera síncrona, produciendo estas ondas un par.

- Cuando la carga es incrementada en el motor, la velocidad del rotor disminuye y se produce un mayor deslizamiento, donde dichas corrientes inducidas en el rotor son incrementadas y se produce un mayor par.
- Al incremento del deslizamiento  $s > 1$ , la máquina tiende a disminuir la velocidad hasta frenar la velocidad del rotor, si perdura la región de frenado puede sobrecalentar los embobinados internos de la máquina de inducción pudiendo dañar la máquina internamente.
- Eléctricamente el análisis de la fuerza magnetomotriz y el flujo de un motor de inducción polifásica es semejante al análisis de un transformador.
- La ventaja de las aplicaciones del motor de inducción en el deslizamiento al que ocurre el par máximo puede controlarse al variar la resistencia del rotor, donde una resistencia alta del rotor produce condiciones óptimas de arranque, pero un desempeño de funcionamiento deficiente. Sin embargo, una baja resistencia del rotor da por resultado condiciones insatisfactorias de arranque.
- Se obtuvieron conocimientos teóricos acerca de la máquina de inducción trifásica utilizada como motor y como generador, como son sus regiones de operación, su comportamiento, ventajas y desventajas. Posteriormente en el Capítulo 5, se verá lo práctico, obteniendo los parámetros del circuito equivalente.

# Capítulo 5

## Pruebas de laboratorio realizadas a la máquina de inducción

### 5.1 Introducción

A principios del siglo XX se impuso el sistema trifásico europeo frente al bifásico americano, por lo que las máquinas empezaron a ser (y son) trifásicas. La importancia de los motores de inducción se debe a su construcción robusta y simple, en el caso especial, el de jaula de ardilla, con un excelente servicio con pequeño mantenimiento. En la actualidad el 80% de los motores eléctricos industriales emplean este tipo de máquinas, trabajando a una frecuencia de alimentación constante, donde a sufrido como inconveniente, la limitación para regular su velocidad, siendo remplazados por otro tipo de motores como el de Corriente Directa (CD). Pero a finales del siglo XX y con el desarrollo de la electrónica industrial, con accionamientos electrónicos como inversores, cicloconvertidores y microprocesadores de electrónica de potencia, se han realizado grandes cambios, y los motores de inducción se están imponiendo poco a poco.

Las máquinas asíncronas tienen un circuito magnético sin polos salientes estando ranurados tanto el estator como el rotor, los cuales van a estar sometidos a la acción de campos magnéticos giratorios que darán lugar a pérdidas magnéticas, donde el devanado del estator normalmente es trifásico. El devanado del rotor siempre es polifásico. Ambos devanados tienen el mismo número de polos ( $2p$ ).

A partir de este capítulo, salvo a indicación en sentido contrario, se referirá a las máquinas asíncronas polifásicas (normalmente trifásicas), las utilizadas más frecuentemente en la industria. La estructura de la presente tesis tendrá características de continuidad con la tesis de Modos de operación de la máquina síncrona, con el fin de que el lector se encuentre ya familiarizado con la presente tesis.

## 5.2 Obtención del circuito equivalente

El circuito equivalente que se estudia, será el mostrado en la Figura 4.11, obteniendo los resultados de las pruebas del subtema 4.5 y 4.7 del Capítulo 4. Donde, el presente capítulo describe las propiedades importantes de la MIRD y de la MIJA, como motor, generador y generador autoexcitado, sin utilizar un diagrama de circuito, y se analiza algunas características operacionales observando sus diferencias básicas.

### 5.2.1 Prueba en vacío

En esta sección se obtendrán valores experimentales con el uso de equipo eléctrico como la máquina de jaula de ardilla y la máquina de rotor devanado, para la obtención de parámetros del circuito equivalente de la máquina de inducción, así como equipos de medición con los que cuenta el LaFIE. Las características nominales de las máquinas de inducción se describen en la Tabla 5.1:

Tabla 5.1 Datos nominales de las máquinas de inducción.

a) Máquina jaula de ardilla	b) Máquina de rotor devanado
Potencia nominal = 186 W = 1/4 Hp	Potencia nominal = 186 W = 1/4 Hp
Corriente de línea = 2.8 A	Corriente de línea = 1.3 A
Voltaje de línea a línea = 208 VCA	Voltaje de línea a línea = 208 VCA
Voltaje de línea a neutro = 120 VCA	Voltaje de línea a neutro = 120 VCA
Velocidad nominal = 1800 rpm	Velocidad nominal = 1500 rpm
Frecuencia nominal = 60 Hz	Frecuencia nominal = 60 Hz
Alimentación = 3Ø	Alimentación = 3Ø

La conexión física de la MIJA en vacío, se muestra en la Figura 5.1 y la conexión de la MIRD en vacío, se muestra en la Figura 5.2.

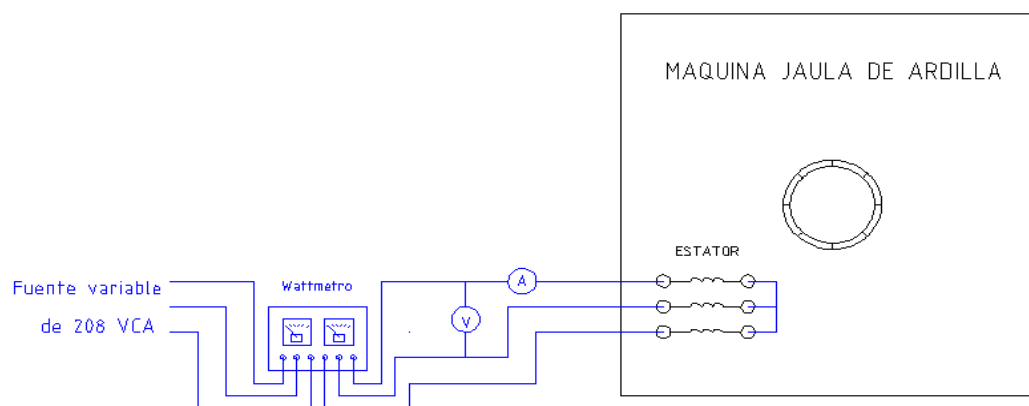


Figura 5.1 Conexión física en vacío de la MIJA.

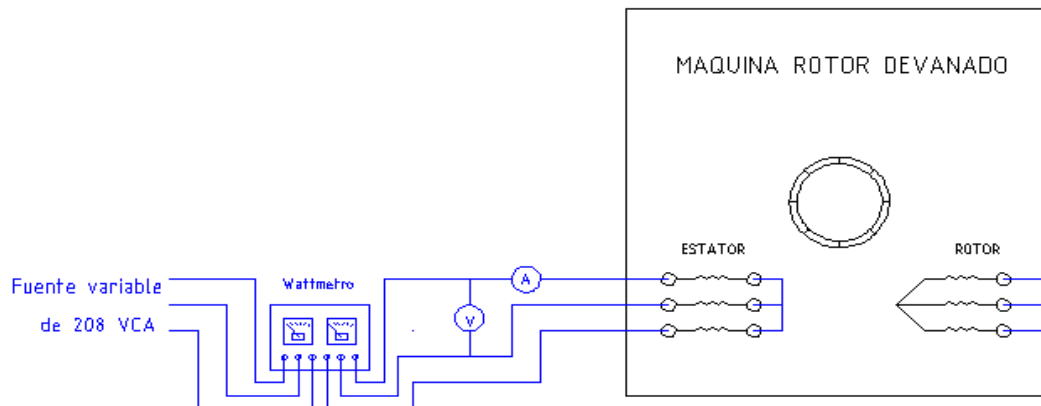


Figura 5.2 Conexión física en vacío de la MIRD.

Para obtener la reactancia de magnetización, las máquinas de inducción operan sin carga a frecuencia nominal (60 Hz), al funcionar el motor en vacío, la corriente absorbida por el motor es pequeña y por lo tanto la caída de tensión en la resistencia y reactancia del estator son despreciables.

Al girar el motor a una velocidad próxima a la de sincronismo, el valor del deslizamiento es pequeño y, consecuentemente el valor de  $R_2/s$  será muy grande y la corriente que le circula muy pequeña para las máquinas de las Figuras 5.1 y 5.2, obteniendo así los valores de la Tabla 5.2, a) Para una MIJA y b) Para una MIRD.

Tabla 5.2 Valores obtenidos de las máquinas de inducción en vacío.

a) Máquina jaula de ardilla	b) Máquina de rotor devanado
Voltaje 3Ø = 208 V	Voltaje 3Ø = 208 V
$I_a = 0.73$ A	$I_a = 0.76$ A
$I_b = 0.74$ A	$I_b = 0.8$ A
$I_c = 0.71$ A	$I_c = 0.76$ A
$P = 72$ W	$P = 64$ W
$S = 269$ VA	$S = 290$ VA
$Q = 262$ VAR	$Q = 281$ VAR
$f_p = 0.27$	$f_p = 0.22$

Por lo tanto en vacío la  $I_1=I_0$ ;  $I_2 = 0$ , donde se visualiza más claramente en la Figura 4.12, como Ejemplo; para la MIJA, en la fase “a” los cálculos para conocer las pérdidas mecánicas, se extrae su velocidad en vacío. Despreciando la resistencia y la reactancia de fuga de los devanados del estator, la potencia activa consumida por el



motor se emplea en las pérdidas en el núcleo. Considerando los parámetros de la MIJA por fase de la Tabla 5.2a, la resistencia equivalente para las pérdidas en el núcleo será:

$$R_c = \frac{V_{1\phi}^2}{P_{1\phi}} = \frac{120V^2}{24W} = 0.6K\Omega$$

Del mismo modo, la reactancia magnetizante será:

$$X_M = \frac{V_{1\phi}^2}{\sqrt{V_{1\phi}^2 I_{1\phi}^2 - P_{1\phi}^2}} = \frac{120V^2}{\sqrt{120^2 * 0.73^2 - 24^2}} = 171\Omega$$

### 5.2.2 Prueba de rotor bloqueado

Para la obtención de esta prueba es necesaria la ayuda de un freno electromecánico el cual es alimentado en sus terminales por un voltaje 120 VCA o 120 VCD, ya que cuenta con un embobinado interno de funcionamiento, la cual inmovilizara la flecha de manera física como lo muestra la Figura 5.3, de tal manera que no pueda moverse, respetando la conexión de la Figura 5.1 y la Figura 5.2.



Figura 5.3 Freno electromecánico, para la prueba de rotor bloqueado.

En esta prueba es aplicado al estator un voltaje de CA, de una magnitud tal, que haga circular una corriente aproximadamente igual a la nominal, sin superar su corriente nominal, la información levantada se muestra en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Valores 3Ø obtenidos de las máquinas de inducción en rotor bloqueado.

a) Máquina jaula de ardilla	b) Máquina de rotor devanado
Voltaje 3Ø = 69 V	Voltaje 3Ø = 89 V
I <sub>a</sub> = 1.49 A	I <sub>a</sub> = 1.48 A
I <sub>b</sub> = 1.51 A	I <sub>b</sub> = 1.5 A
I <sub>c</sub> = 1.49 A	I <sub>c</sub> = 1.48 A
P = 144 W	P = 192 W
S = 181 VA	S = 233 VA
Q = 99 VAR	Q = 126 VAR
f <sub>p</sub> = 0.8	f <sub>p</sub> = 0.84

Como el rotor no se mueve, el deslizamiento  $s = 1$ , y la resistencia total del rotor  $R_2/s$  es justamente igual a  $R_2$  (que es un valor pequeño). Como  $R_1$  y  $R_2$  son pequeñas, la mayor parte de la corriente de entrada circula por ellas, en lugar de hacerlo a través de la reactancia de magnetización  $X_M$  que es mucho más grande, bajo estas condiciones, el circuito se ve como una combinación en serie de  $X_1$ ,  $R_1$ ,  $X_2$  y  $R_2$ .

Existe un problema con esta prueba. En operación normal, la frecuencia en el estator es la frecuencia de la línea del sistema de potencia (60 Hz). En condiciones de arranque la frecuencia en el rotor es también la frecuencia de la línea. En condiciones normales de operación, la mayoría de los motores tienen un deslizamiento de 2 a 4 por ciento y la frecuencia resultante en el rotor está entre 1 y 3 Hz. Esto crea un inconveniente, pues la frecuencia de la línea no representa las condiciones reales de operación normal del rotor, una frecuencia incorrecta en el rotor puede conducir a resultados equivocados. Un término medio es utilizar una frecuencia igual al 25 por ciento de la frecuencia nominal o menor. Esta aproximación es aceptable para rotores de resistencia constante, pero deja en serio cuando se trata de rotores de resistencia variable. Por estos problemas y otros similares, las mediciones durante esta prueba deben tomarse con mucho cuidado.

Después de haber seleccionado la frecuencia, se regula el voltaje hasta lograr que la corriente que entra al motor sea aproximadamente igual al valor nominal y rápidamente, antes de que el rotor se caliente demasiado.

El factor de potencia con el rotor bloqueado para la MIIA para la fase “a” (Para obtener un voltaje por fase, el voltaje se divide entre  $\sqrt{3}$ , y la potencia se divide entre 3), de la Tabla 5.3a, se puede calcular como:

$$fp = \cos \theta = \frac{P_{entr}}{\sqrt{3}V_t I_L} = \frac{144W}{\sqrt{3} * 69V * 1.49A} = 0.8$$

Donde la resistencia equivalente del motor en cortocircuito se calcula como:

$$|R_{eq}| = R_1 + a * R_2 = \frac{P_{1\phi Rot-Bloq}}{I_{1\phi Rot-Bloq}^2} = \frac{23W}{1.49^2 A} = 10\Omega$$

El valor de la reactancia del circuito equivalente en cortocircuito es:

$$|X_{eq}| = X_1 + a^2 * X_2 = \frac{\sqrt{V_{1\phi Rot.Bloq}^2 * I_{1\phi Rot-Bloq}^2 - P_{1\phi Rot-Bloq}^2}}{I_{1\phi Rot-Bloq}^2}$$

$$|X_{eq}| = \frac{\sqrt{40V^2 * 1.49A^2 - 48W^2}}{1.49A^2} = 15.9\Omega$$

La Ecuación 5.1, describe las resistencias del circuito equivalente, donde desafortunadamente no existe un manera sencilla de separar las partes correspondientes a las reactancias del estator y del rotor, que se muestra en la Ecuación 5.2, existiendo unas reglas empíricas que nos ayudan a comprender su comportamiento el cual se encuentra descrito en la Tabla 5.4, en el Apéndice A y B, existe una breve explicación de dichas clases de rotores [Chapman, 2005].

$$R_{Th} = R_1 + R_2' \quad (5.1)$$

$$X_{Th} = X_1 + X_2' \quad (5.2)$$

Donde:

$$X_2' = a * X_2 \quad (5.3)$$

$$R_2' = a * R_2 \quad (5.4)$$

$$a = \frac{N_p}{N_s} \quad (5.5)$$

Tabla 5.4 Reglas empíricas para separar las reactancias  $X_1$  y  $X_2$ .

Clase de rotor	$X_1$ y $X_2$ como funciones de $X_T$	
	$X_1$	$X_2$
Rotor devanado	$0.5X_T$	$0.5X_T$
Clase A	$0.5X_T$	$0.5X_T$
Clase B	$0.4X_T$	$0.6X_T$
Clase C	$0.3X_T$	$0.7X_T$
Clase D	$0.5X_T$	$0.5X_T$

### 5.3 Deslizamiento de la máquina de inducción

Las máquinas de inducción pueden operar en función del deslizamiento como motor, generador y freno, a continuación se explica un breve repaso en función de la Figura 5.4:

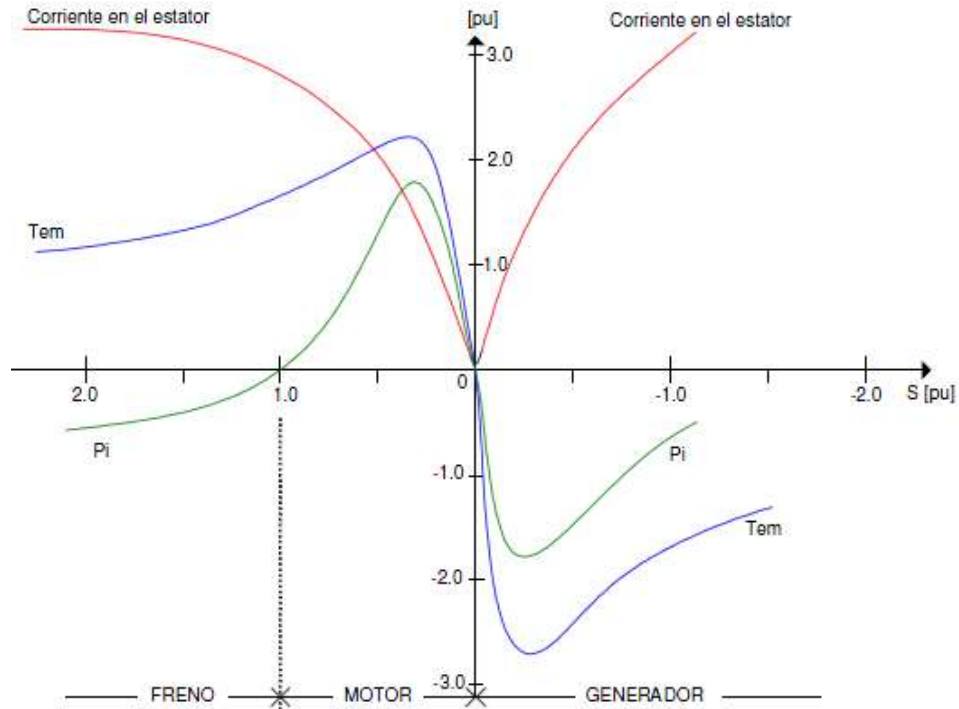


Figura 5.4 Región de operación de la máquina de inducción.

**Motor:** Para que la potencia y el par en el eje sean positivos es necesario que la potencia transferida a las resistencias  $\frac{R_2}{s}$  y  $\frac{1-s}{s}R_2$  deben ser positivas, como lo muestra la Ecuación 5.6:

$$\frac{1}{s} \geq 0; \frac{1-s}{s} \geq 0 \Rightarrow 0 \leq s \leq 1 \quad (5.6)$$

En la zona de motorización, la carga es accionada por la máquina y se consume potencia de la red.

**Generador:** La operación como generador requiere que la máquina entregue potencia por el estator. La energía entra por el eje mecánico, atraviesa el entrehierro y llega al estator. En el circuito equivalente este fenómeno se obtiene cuando la resistencia

de carga  $\frac{1-s}{s}R_2$ , es negativa. La potencia generada por esta resistencia proviene del accionamiento mecánico externo, como lo muestra la Ecuación 5.7.

$$s \leq 0 \quad (5.7)$$

Cuando el deslizamiento del rotor es negativo, la resistencia es negativa también. Un deslizamiento negativo implica que la velocidad del rotor es mayor que la velocidad sincrónica, en estas condiciones el campo magnético rotatorio que se produce en el rotor adelanta al campo magnético rotatorio del estator, el par eléctrico se invierte de sentido y la potencia fluye desde el rotor hacia el estator.

**Freno:** Si la máquina gira en sentido contrario al del campo magnético rotatorio, el deslizamiento es mayor que uno, como lo muestra la Ecuación 5.8:

$$s > 1 \quad (5.8)$$

Para esta condición la resistencia de carga es negativa, En estas condiciones la máquina consume potencia tanto de la fuente como del eje mecánico. Toda esta potencia se disipa como pérdidas en las resistencias pasivas del circuito equivalente. En este caso la máquina utiliza potencia eléctrica de la fuente para oponerse al sentido del movimiento. Estos puntos de operación pueden utilizarse para frenar un motor. Durante el funcionamiento como freno la máquina disipa internamente mucha energía y esto ocasiona un calentamiento importante, por esta razón este tipo de operación tan solo debe utilizarse durante cortos períodos de tiempo. Para que la máquina de inducción opere en la condición de freno, es necesario que se invierta el sentido de giro del campo magnético rotatorio con respecto a la velocidad del rotor. Esto se puede lograr invirtiendo la conexión de dos fases del estator, el sentido de giro del campo se invierte y la máquina entra en la condición de freno. El par eléctrico que produce la máquina tiene sentido contrario al movimiento del rotor, y la carga mecánica disminuye su velocidad. Cuando el rotor se detiene, se desconecta la máquina de la red y culmina el proceso de frenado.

## 5.4 Operación del motor de inducción

Las partes fundamentales del estator y rotor de la máquina de inducción son las siguientes:

**Estator:** Su devanado es trifásico y se encuentra distribuido en ranuras  $120^\circ$ , por construcción es el mismo que el de una máquina síncrona.

**Rotor jaula de ardilla:** Los conductores del rotor se encuentran distribuidos por la periferia del rotor, donde los extremos de estos se encuentran cortocircuitados, por tanto no hay posibilidad de conectarlo al exterior y la posición inclinada de las ranuras mejora las propiedades de arranque y disminuye los ruidos.

**Rotor devanado:** Sus devanados son similares al del estator al cual se encuentra asociado, el número de fases del rotor no tiene que ser al mismo número de fases que el del estator, lo que si tiene que ser igual es el número de polos. Los devanados del rotor están conectados a anillos colectores montados sobre el mismo eje.

El principio de funcionamiento del motor de inducción es como se muestra en la Figura 5.5.

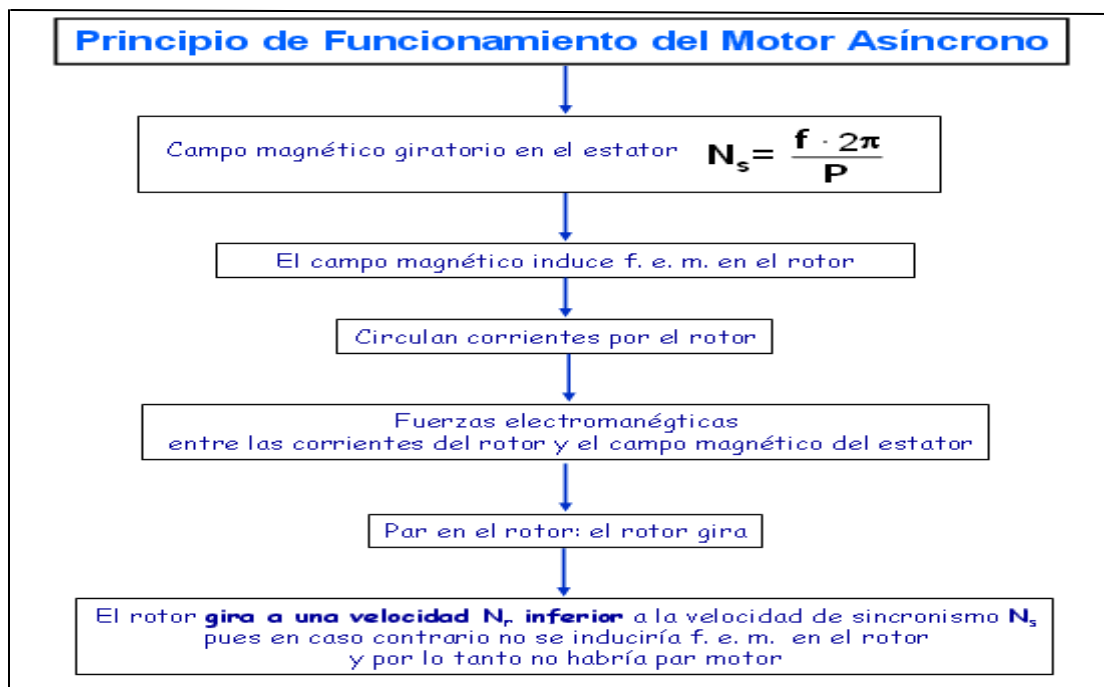


Figura 5.5 Principio de funcionamiento de la máquina de inducción.

La Figura 5.6, muestra la conexión física de un motor jaula de ardilla unido a un electrodinamómetro por medio de una banda, el cual aplica un freno en forma de par, donde la Tabla 5.5, muestra sus datos de operación levantados de una máquina de jaula de ardilla de  $\frac{1}{4}$  Hp del LaFIE.

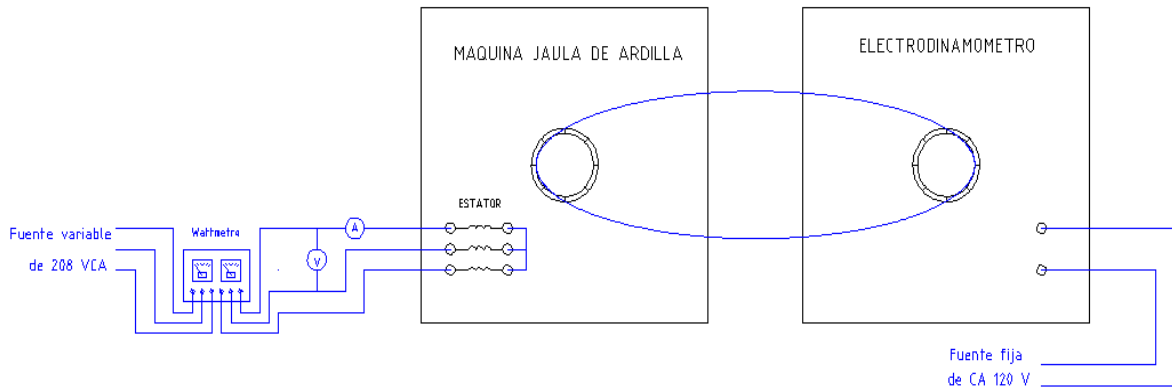


Figura 5.6 Conexión física de la MIJA.

Tabla 5.5 Datos de la MIJA de ¼ Hp.

$T_{mec}$	$I_{línea}$	$V_{f-f}$	$Q$	$P_{ent}$	$s$	$Fp$	$n_r$
0	0.765	207	250	44	0.002	0.175	1796
1	0.81	208	239	104	0.014	0.395	1774
2	0.835	208	236	128	0.019	0.47	1765.5
3	0.875	208	233	156	0.024	0.55	1757.5
4	0.91	208	231	176	0.032	0.6	1743
5	0.965	207	226	204	0.039	0.67	1730.5
6	1.01	208	227	224	0.045	0.7	1719
7	1.075	208	230	256	0.052	0.74	1707
8	1.115	208	226	280	0.059	0.77	1694.5
9	1.19	207	226	312	0.067	0.81	1679.5
10	1.25	207	228	332	0.074	0.825	1666
11	1.34	208	232	364	0.085	0.84	1647.5
12	1.41	208	239	404	0.094	0.875	1630.5

Donde:

- $n_r$  Velocidad del rotor en rpm
- $I_{línea}$  Corriente de alimentación en Amperios
- $V_{f-f}$  Voltaje de fase a fase en Volts
- $T_{mec}$  Par mecánico en lbf-in
- $Q$  Potencia reactiva en VAR's
- $P_{ent}$  Potencia de suministro en W
- $s$  Deslizamiento
- $fp$  Factor de potencia

La Figura 5.7, muestra la conexión física de un motor de inducción de rotor devanado unido a un electrodinamómetro por medio de una banda, el cual aplica un

freno en forma de par, donde la Tabla 5.6, muestra sus datos de operación levantados de una máquina de rotor devanado de ¼ Hp del LAFIE.

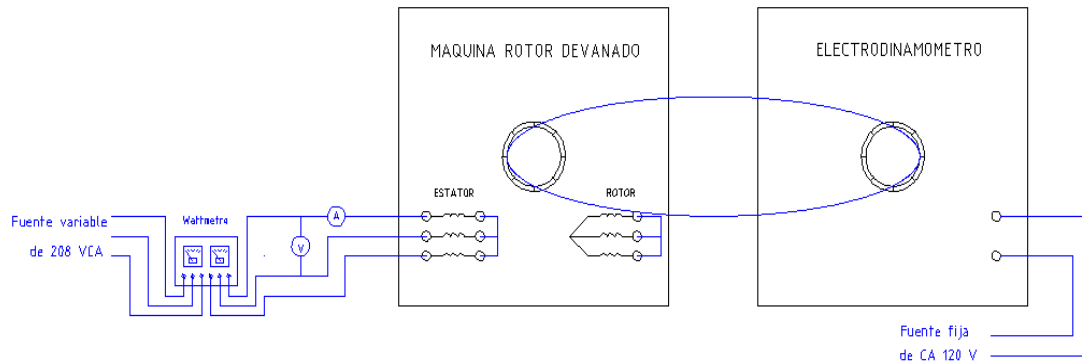


Figura 5.7 Conexión física de la MIRD.

Tabla 5.6 Datos de la MIRD de ¼ Hp.

$T_{mec}$	$I_{línea}$	$V_{f-f}$	$Q$	$P_{ent}$	$s$	$I_r$	$Fp$	$n_r$
0	0.77	208	274	44	0.002	0.20	0.17	1796
1	0.82	208	248	108	0.032	0.37	0.4	1743
2	0.84	208	242	132	0.036	0.49	0.475	1736
3	0.88	208	238	160	0.041	0.66	0.555	1726
4	0.915	208	234	180	0.050	0.82	0.605	1709.5
5	0.965	207	228	208	0.065	0.98	0.67	1682.5
6	1.015	207	230	228	0.073	1.14	0.715	1668
7	1.075	208	227	260	0.088	1.33	0.75	1641
8	1.12	207	229	284	0.098	1.41	0.78	1624
9	1.195	207	229	316	0.108	1.59	0.815	1605.5
10	1.265	207	228	344	0.126	1.82	0.835	1574
11	1.35	208	235	372	0.141	1.92	0.845	1546.5
12	1.43	208	241	412	0.158	2.18	0.865	1515.5

Donde:

- $n_r$  Velocidad del rotor en rpm
- $I_{línea}$  Corriente de alimentación en Amperios
- $I_r$  Corriente del rotor en Amperios
- $V_{f-f}$  Voltaje de fase a fase en Volts
- $T_{mec}$  Par mecánico en lbf-in
- $Q$  Potencia reactiva en VAR's
- $P_{ent}$  Potencia de suministro en W
- $s$  Deslizamiento
- $fp$  Factor de potencia



Los datos de la Tabla 5.5 y de la Tabla 5.6, se levantaron con ayuda de multímetros digitales, Medidores de potencia y un tacómetro para medir la velocidad.

Las características de una MIJA, y de una MIRD se explican de forma breve en los posteriores subtemas.

#### 5.4.1 Característica corriente-potencia útil

Conociendo la potencia útil transmitida y la corriente absorbida por el motor, se muestra en la Figura 5.8 el comportamiento de la curva corriente-potencia útil, donde se destaca lo siguiente:

- Se visualiza la corriente consumida por cada máquina cuando aumenta la corriente se exige más potencia en el eje del motor.
- La corriente consumida no es lineal, por las pérdidas del motor.
- Puede darse el caso que la corriente absorbida por el motor se mantenga prácticamente constante.
- El funcionamiento de la curva corriente-potencia útil es muy similar en el motor jaula de ardilla como en el de rotor devanado.

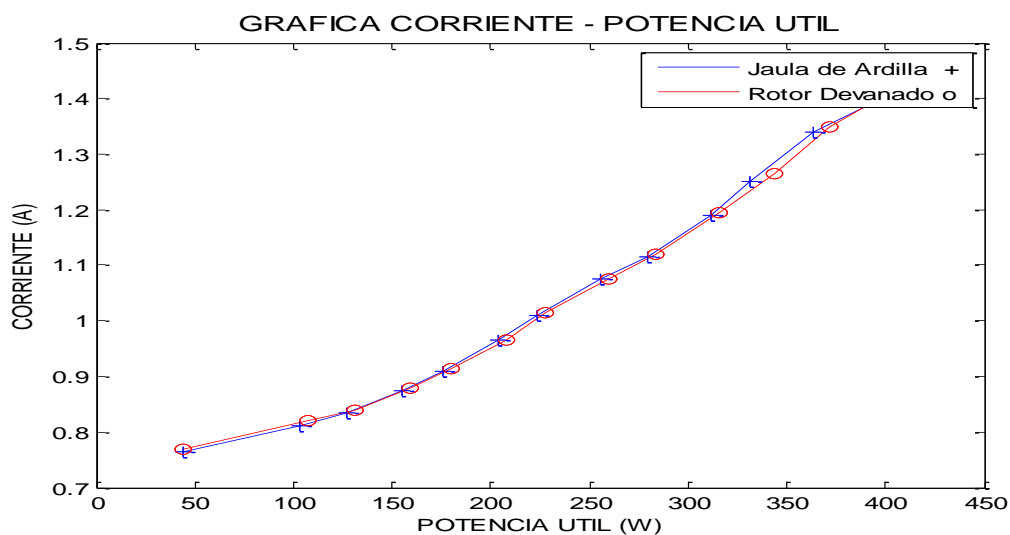


Figura 5.8 Gráfica corriente-potencia útil

#### 5.4.2 Característica corriente-velocidad

En la Figura 5.9, muestra la grafica corriente-velocidad, donde el motor es alimentando con una tensión menor a la nominal, tanto para el motor jaula de ardilla, como para el motor devanado, donde se destaca lo siguiente:

- a) Los motores de inducción no pueden girar a velocidad de sincronismo por si mismos ya que necesitan un motor de arrastre conectado al motor de inducción.
- b) Debe producir el suficiente par, para vencer las pérdidas mecánicas del motor.
- c) La velocidad del motor consume una corriente y crea el campo magnético en la máquina y da respuesta a las pérdidas eléctricas y magnéticas.
- d) Se observa que el motor de jaula de ardilla posee una corriente de arranque brusca en comparación con el motor de rotor devanado.
- e) El motor de rotor devanado posee la capacidad de agregar resistencias externas en el eje del rotor, con el fin de reducir la corriente de arranque.

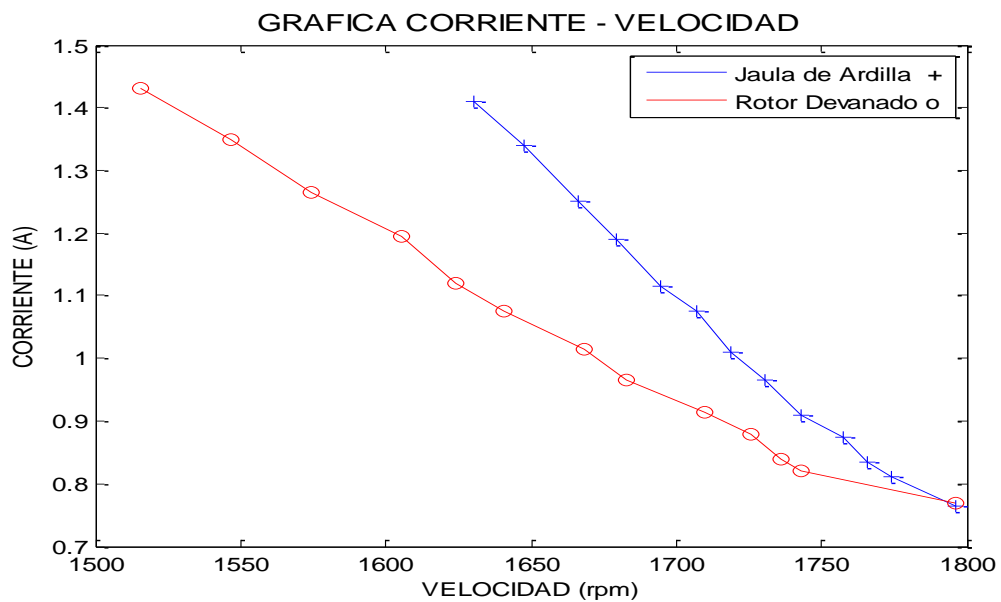


Figura 5.9 Gráfica corriente-velocidad

### 5.4.3 Característica $\cos \theta$ -potencia útil

La Figura 5.10, muestra la potencia útil y el factor de potencia del motor de jaula de ardilla y el motor de rotor devanado. Donde se destacan los siguientes puntos:

- a) El factor de potencia (fp) mejora con la potencia suministrada, pasando por un fp bajo a un valor relativamente alto para el funcionamiento nominal del motor de inducción.
- b) La proporción de potencia transmitida no es lineal, ya que el fp crece con la potencia útil hasta alcanzar un valor máximo, para decrecer en la zona de funcionamiento inestable del motor hasta alcanzar el fp de arranque para velocidad cero y además presenta cierta curvatura.

- c) El fp nominal del motor de jaula de ardilla es de 0.875 y en vacío es de 0.175.
- d) El fp nominal del motor de rotor devanado es de 0.865 y en vacío es de 0.17.
- e) Para un motor de rotor devanado, al aumentar la resistencia rotorica para un mismo fp menor será la potencia útil suministrada al motor, es decir; disminuye su pendiente al aumentar la resistencia externa en el eje del rotor.

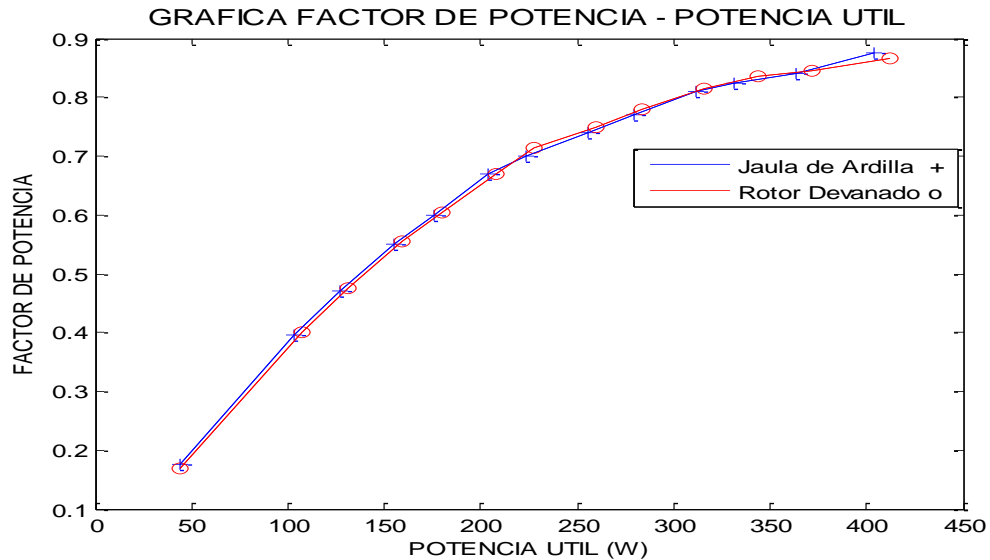


Figura 5.10 Gráfica  $\cos \theta$ -potencia útil.

#### 5.4.4 Característica Par-velocidad

En la Figura 5.11, se presenta las curvas par-velocidad del motor de inducción jaula de ardilla y rotor devanado, la información característica que poseen es la siguiente:

- a) Para que se genere un par es indispensable que por el rotor circule una corriente, para que circule una corriente es necesario inducir una tensión en el rotor, y para que se induzca una tensión en el rotor es necesaria una velocidad de giro del rotor y la velocidad de sincronismo del campo magnético generado por el estator deben ser diferentes. Es decir; si el rotor gira a la misma velocidad de sincronismo no se genera el par motor que mantendría el motor girando a la velocidad de sincronismo.
- b) El par inducido del motor es cero a velocidad de sincronismo.
- c) El par máximo equivale a 2 o 3 veces el par nominal y no puede ser excedido.

- d) El par de arranque es de 6.071 lbf-in y el par máximo es de 11.6 lbf-in, donde el par de arranque es ligeramente mayor al par de plena carga.
- e) Para frenar con rapidez el motor, se conmutan dos fases, es decir; se invierte la dirección de rotación del campo magnético.
- f) La grafica simulada, muestra el comportamiento de la curva par-velocidad completa, ya que en forma practica es muy difícil o imposible observar su comportamiento, desde el par de arranque al par de desenganche ya que fuerza al motor a unas condiciones que en el tiempo puede destruir a la propia máquina (van en el orden de los microsegundos).
- g) El comportamiento de la curva par-velocidad de un motor de jaula de ardilla muestra un desfase con el motor de rotor devanado.
- h) La curva par-velocidad, cumple con el comportamiento de operatividad como motor, así como su deslizamiento interno, tanto para un motor de jaula de ardilla como para un motor de rotor devanado.

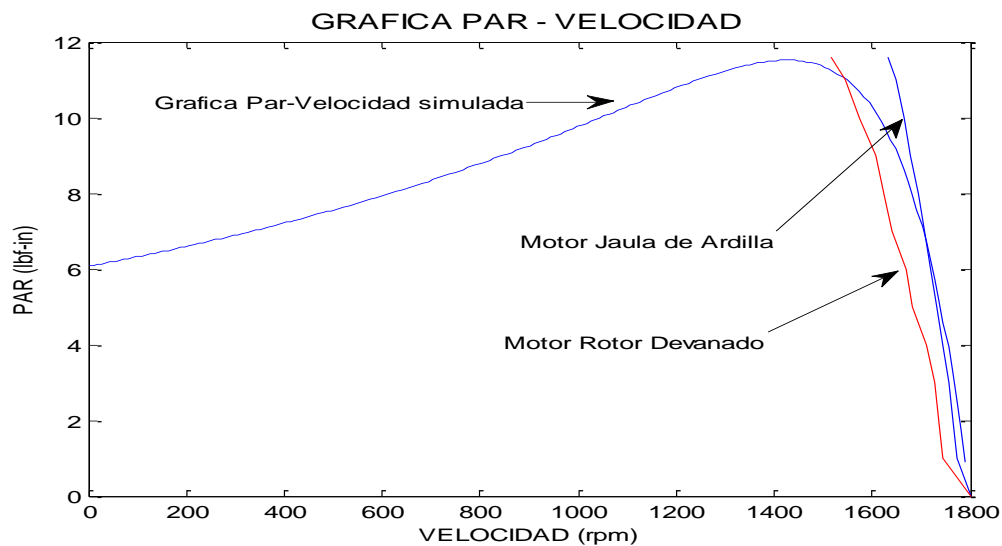


Figura 5.11 Gráfica Par-velocidad.

La Figura 5.12, muestra que para un mismo par ejercido por el motor devanado, al aumentar la resistencia rotorica disminuye la velocidad de giro del motor, y por otro lado, aumenta el par de arranque, obteniéndose los siguientes datos:

- a) El par de desenganche se mantiene constante con la resistencia rotorica.
- b) Cuando aumenta la resistencia rotorica, aumenta el par de arranque.

- c) Al aumentar el par de arranque, la corriente rotorica disminuye y la potencia útil disminuye.
- d) La potencia máxima que debe suministrarse al motor en estas condiciones, debe de ser por un periodo de tiempo corto ya que corre el peligro de destrucción del motor por temperatura, y aumenta la velocidad que suministra el par de desenganche (precaución).

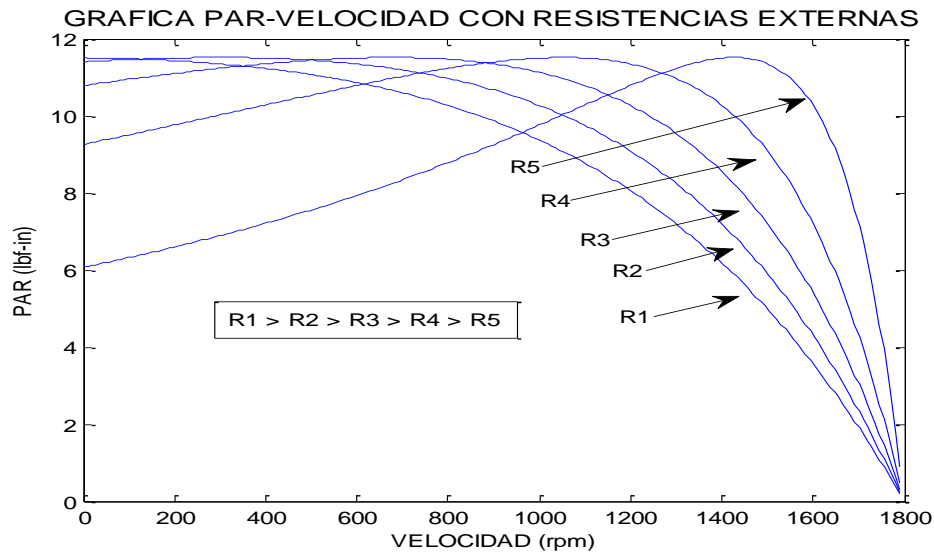


Figura 5.12 Gráfica Par-velocidad con resistencias externas.

#### 5.4.5 Característica velocidad-potencia útil

La Figura 5.13, muestra la curva velocidad-potencia útil, donde su operatividad comienza de cero hasta la velocidad de sincronismo, donde la respuesta a este procedimiento es el siguiente:

- a) La velocidad del rotor disminuye cuando la potencia útil aumenta.
- b) La relación velocidad-potencia útil no es lineal, ya que no es proporcional.
- c) En un motor de rotor devanado, al variar la resistencia externa, provoca una caída de velocidad del rotor y la potencia útil que puede transmitir a la carga conectada al eje.
- d) En un motor de rotor devanado, cuando menor es la corriente rotorica, la relación velocidad-potencia útil adquiere mayor curvatura.
- e) Al variar la resistencia rotorica también varia la relación velocidad-potencia útil.

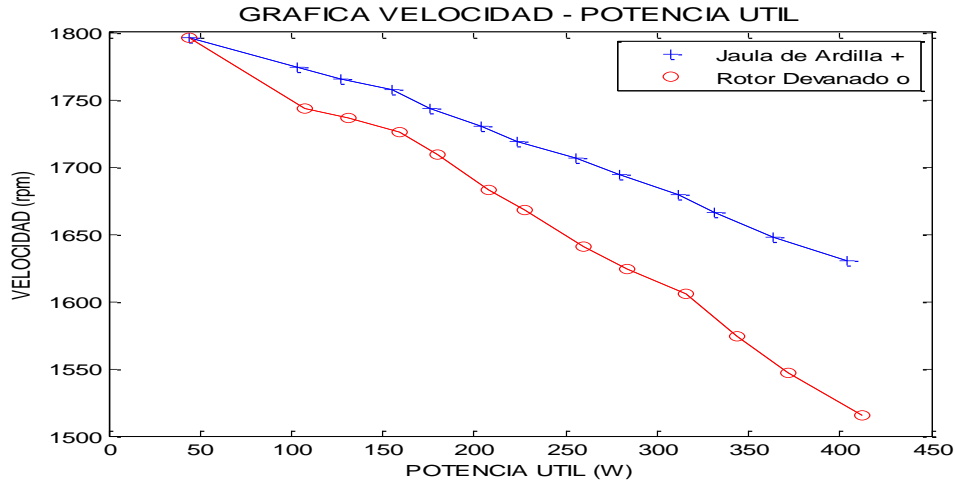


Figura 5.13 Gráfica velocidad-potencia útil.

## 5.5 Operación del generador de inducción

El generador de inducción, tiene pocas aplicaciones como generador, por muchas desventajas que posee, como por ejemplo, para crear su campo magnético consume potencia reactiva  $Q$ , el voltaje generado y la frecuencia generada, están por debajo de lo deseado, por lo que requieren más inversión en equipos para su corrección, como es el caso de bancos de capacitores, uso de la electrónica de potencia, etc. Existen dos tipos de generación de inducción:

- a) Generador conectado al bus
- b) Generador Autoexcitado o aislado

### 5.5.1 Generador conectado al bus

La Figura 5.14, muestra la comparación de los principios básicos de funcionamiento de un generador de inducción y de un generador síncrono, donde se puede apreciar que el generador de inducción absorbe potencia reactiva por lo que requiere reactivos externos. Mientras que un generador síncrono genera potencia reactiva, pero necesita de un medio de excitación de corriente continua.

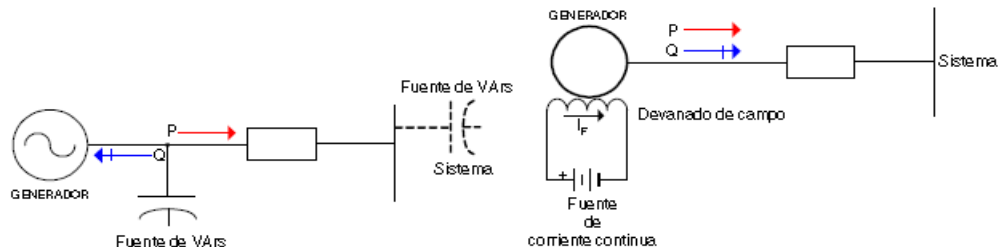


Figura 5.14 Comparación entre un generador de inducción y un generador síncrono.

La Figura 5.15, muestra la conexión física del generador jaula de ardilla, en donde es accionado por un primotor de CD, que le ayuda a vencer el par mecánico, ayudándolo a sobrepasar la velocidad de sincronismo con ayuda de una banda que une las dos flechas, los datos obtenidos en la Tabla 5.7, se levantaron de forma practica gracias a la ayuda del equipo eléctrico del LaFIE (multímetros digitales, medidor de armónicos y un tacómetro, para medir la velocidad).

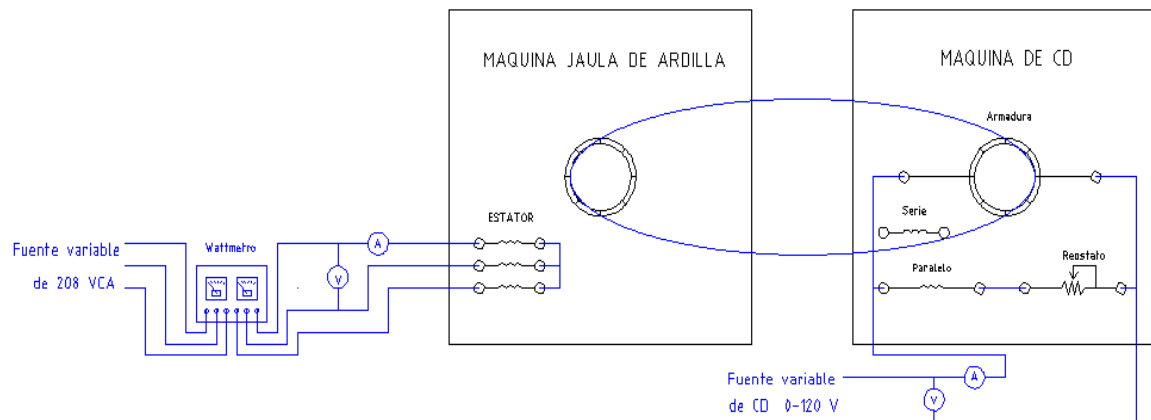


Figura 5.15 Conexión física del generador jaula de ardilla.

Tabla 5.7 Datos obtenidos del generador jaula de ardilla de ¼ Hp.

$n_s$	$I_{línea}$	$V_{f-f}$	$f_e$	$P_{ent}$	$Q$	$fp$	$S$	$f_r$
1500	1	107.6	60	-160	-79	-0.9	0.17	10.00
1550	0.9	107.7	60	-146	-73	-0.9	0.14	8.33
1600	0.77	108	60	-124	-68	-0.88	0.11	6.67
1650	0.65	108.5	60	-101	-64	-0.85	0.08	5.00
1700	0.52	109	60	-75	-60	-0.78	0.06	3.33
1750	0.4	109	60	-45	-60	-0.61	0.03	1.67
1800	0.34	109	60	-12	-63	-0.18	0.00	0.00
1850	0.42	110	60	25	-76	0.31	-0.03	-1.67
1900	0.58	110	60	59	-94	0.54	-0.06	-3.33
1950	0.79	111	60	95	-117	0.63	-0.08	-5.00
2000	1.05	111	60	133	-150	0.67	-0.11	-6.67

Donde:

$n_r$  Velocidad del rotor en rpm

$I_{línea}$  Corriente de alimentación en Amperios

$V_{f-f}$  Voltaje de fase a fase en Volts

$f_e$  Frecuencia de la empresa suministradora en Hz

$f_r$  Frecuencia del rotor en Hz

- $T_{mec}$  Par mecánico en lbf-in
- $Q$  Potencia reactiva en VAR's
- $P_{ent}$  Potencia de suministro en W
- $s$  Deslizamiento
- $fp$  Factor de potencia

La Figura 5.16, muestra la conexión física del generador de rotor devanado, el cual esta interconectado con un primotor, el cual le ayudara a vencer la velocidad de sincronismo.

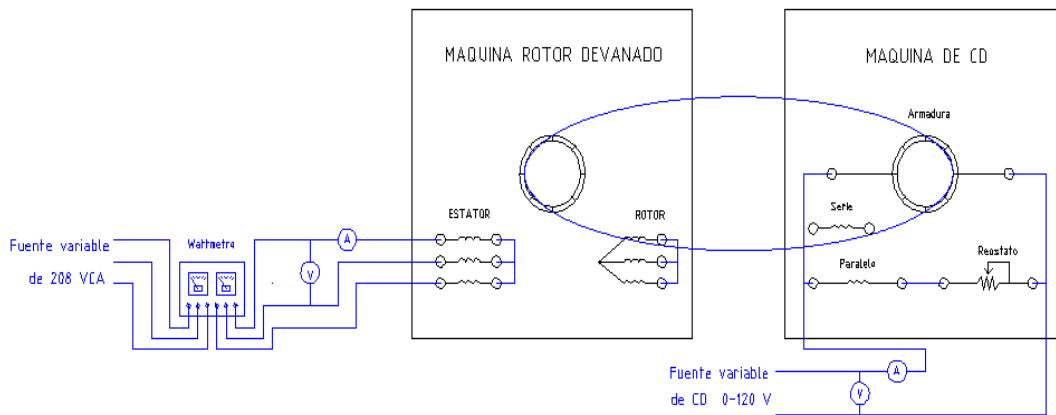


Figura 5.16 Conexión física del generador rotor devanado.

Tabla 5.8 Datos obtenidos del generador rotor devanado de ¼ Hp.

$n_s$	$I_{línea}$	$V_{f-f}$	$f_e$	$P_{ent}$	$Q$	$fp$	$s$	$f_r$
1500	0.57	109	60	-88	-59	-0.83	0.17	10.00
1550	0.51	109	60	-76	-58	-0.8	0.14	8.33
1600	0.45	109	60	-61	-59	-0.72	0.11	6.67
1650	0.4	109	60	-47	-58	-0.63	0.08	5.00
1700	0.36	109	60	-33	-59	-0.49	0.06	3.33
1750	0.34	109	60	-20	-61	-0.31	0.03	1.67
1800	0.34	109	60	-10	-63	-0.16	0.00	0.00
1850	0.34	109	60	3	-65	-0.04	-0.03	-1.67
1900	0.37	110	60	12	-70	0.15	-0.06	-3.33
1950	0.43	110	60	28	-76	0.35	-0.08	-5.00
2000	0.5	110	60	47	-94	0.49	-0.11	-6.67

Donde:

- $n_r$  Velocidad del rotor en rpm
- $I_{línea}$  Corriente de alimentación en Amperios
- $V_{f-f}$  Voltaje de fase a fase en Volts
- $f_e$  Frecuencia de la empresa suministradora en Hz



$f_r$	Frecuencia del rotor en Hz
$T_{mec}$	Par mecánico en lbf.in
$Q$	Potencia reactiva en VAR's
$P_{ent}$	Potencia de suministro en W
$s$	Deslizamiento
$fp$	Factor de potencia

La operatividad del generador jaula de ardilla de la Tabla 5.7 y la operatividad del generador de rotor devanado de la Tabla 5.8, muestran que los voltajes generados. *No siempre están disponibles con los rangos de voltaje adecuados para ser útiles como generadores.*

También se observa que las máquinas de inducción, cuando actúan como generadores, consumen potencia reactiva, por lo cual, es necesaria la implementación de dos bancos de capacitores, uno que le proporcione la potencia reactiva necesaria para la operatividad del generador y otro banco de capacitores que proporcione potencia reactiva al sistema eléctrico.

Al primotor de CD, es necesaria la aplicación de un voltaje de 120 VCD exacto, se recomienda la utilización de una fuente variable de CD, ya que si es utilizado una fuente de voltaje fija de CD, este genera una corriente de campo mayor de 0.4 A, originando un cortocircuito y como consecuencia, se activa la protección.

La máquina de inducción opera como generador cuando la velocidad del rotor es mayor de 1800 rpm. Y la dirección de giro del par inducido se invierte, convirtiendo la potencia mecánica en potencia eléctrica.

Esta inversión de giro del par inducido no es sensible de captarse con el ojo humano, por lo que requiere de un estroboscopio, el cual nos ayuda a ver la inversión de giro del rotor.

El deslizamiento cambia de positivo a negativo al sobrepasar la velocidad de sincronismo (1800 rpm).

A continuación se explican algunas características de las máquinas de inducción en función de la velocidad de sincronismo.

### Característica corriente-velocidad

En la Figura 5.17 se muestra la grafica corriente-velocidad de un generador jaula de ardilla y de un generador de rotor devanado en donde se resume su comportamiento:

- El generador de inducción genera corriente al sistema después de sobrepasar la velocidad de sincronismo.
- La corriente generada de un generador de rotor devanado puede ser modificada, ya que cuenta con la capacidad de agregar resistencias externas en el eje del rotor.
- La corriente consumida y generada de la Figura 5.18, cumple con el principio teórico de operatividad deseada.
- La velocidad máxima generada por el generador de inducción, depende de la corriente nominal de la máquina como generador.

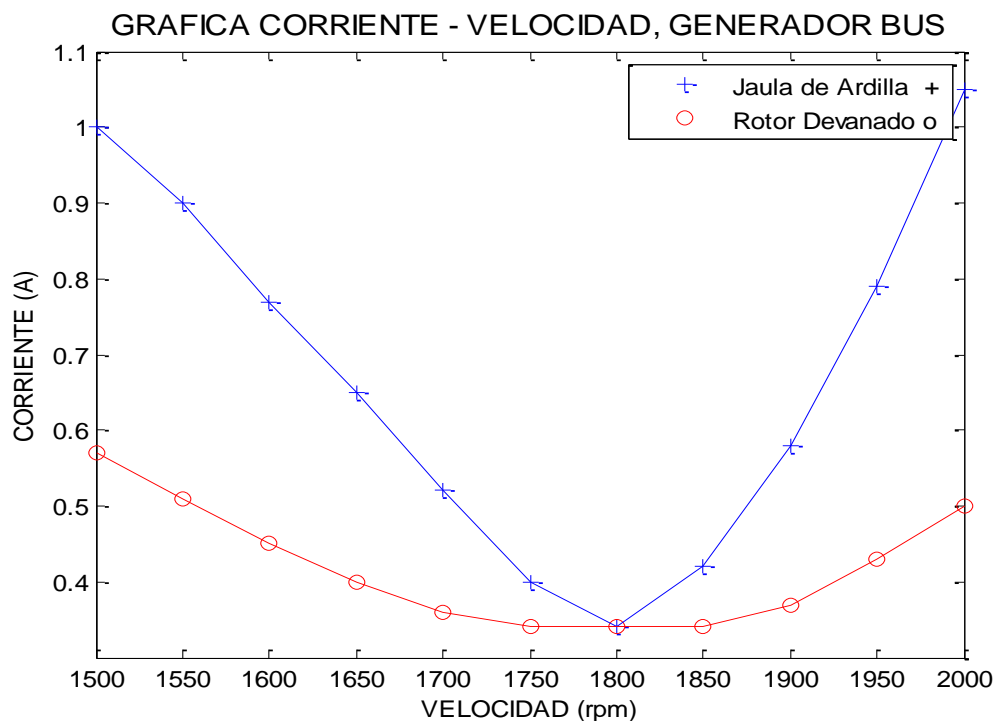


Figura 5.17 Gráfica corriente- velocidad de un generador de inducción de ¼ Hp.

### Característica velocidad-potencia útil

La Figura 5.18, muestra la grafica velocidad-potencia útil del generador de la Figura 5.15 y de la Figura 5.16, donde se destacan los siguientes puntos:

- Al aumentar la velocidad síncrona la potencia útil generada al sistema eléctrico aumenta.

- b) La potencia máxima generada, depende de la corriente nominal como generador a la cual esta fabricada (1.5 A, 1/4 Hp).
- c) La grafica velocidad-potencia útil, no es lineal ya que presenta ligera curvatura, aunque por periodos de tiempo pareciera ser lineal.
- d) La potencia útil generada para un generador jaula de ardilla no es igual, a la potencia útil de un generador de rotor devanado.

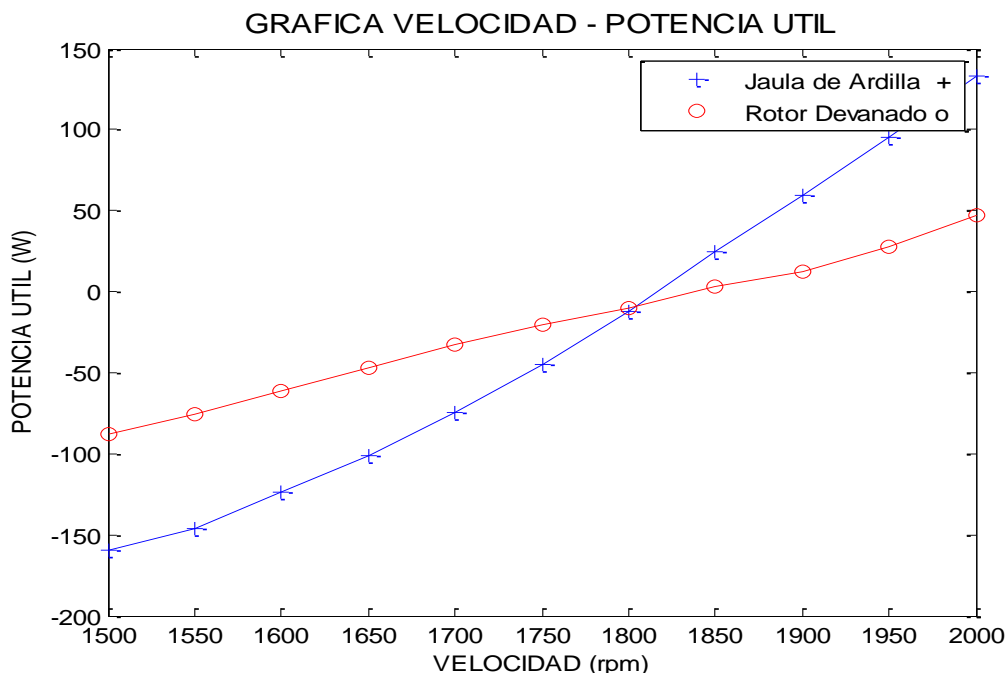


Figura 5.18 Gráfica velocidad-potencia útil de un generador de inducción de ¼ Hp.

### 5.5.2 Generador autoexcitado o aislado

El generador de inducción autoexcitado, también se le conoce como generador aislado, ya que requiere de un suministro de voltaje en el entrehierro, por medio de un banco de capacitores, cuando el rotor empieza a girar, el flujo induce en las bobinas del estator una fuerza electromotriz inicial, la cual hace circular una pequeña corriente por el capacitor de excitación, esta corriente circula por los devanados del estator fortaleciendo el campo magnético, con el fin de disminuir la necesidad de reactivos, el proceso de autoexcitación se inicia operando al generador autoexcitado sin carga, si en este proceso de autoexcitación el requerimiento de reactivos es demasiado alto, los capacitores de excitación del generador autoexcitado no podrán proporcionar la excitación necesaria para que aparezcan voltajes y corrientes en el estator de la máquina.

Un inconveniente de la máquina de inducción como generador, es su incapacidad para establecer un campo magnético que permita que la máquina genere adecuadamente. El generador aislado requiere de algún tipo de excitación que force a operar a un voltaje y frecuencia determinados, por lo regular la fuente requerida que genere o produzca la corriente reactiva  $I_m$  necesaria, que establezca y sostenga dicho campo magnético, La Figura 5.19, muestra al generador autoexcitado, con un banco de capacitores trifásicos conectados en Y en su estator.

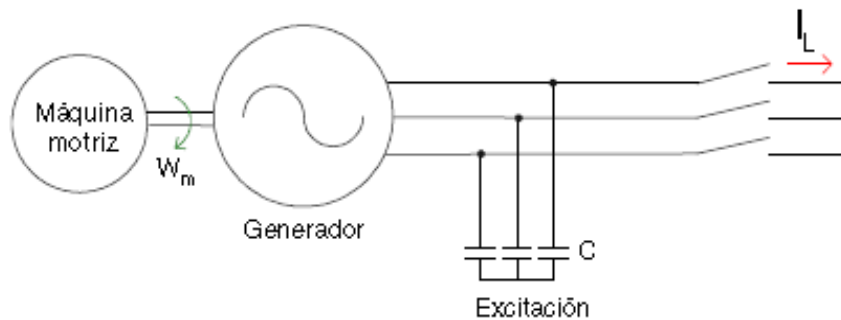


Figura 5.19 Generador de inducción autoexcitado.

La Figura 5.20, muestra la conexión física de un generador aislado jaula de ardilla, donde la máquina motriz, es una máquina de CD, la cual ayuda al generador jaula de ardilla vencer la velocidad de sincronismo, la operación del generador aislado jaula de ardilla se observa el comportamiento de los parámetros de la Tabla 5.9.

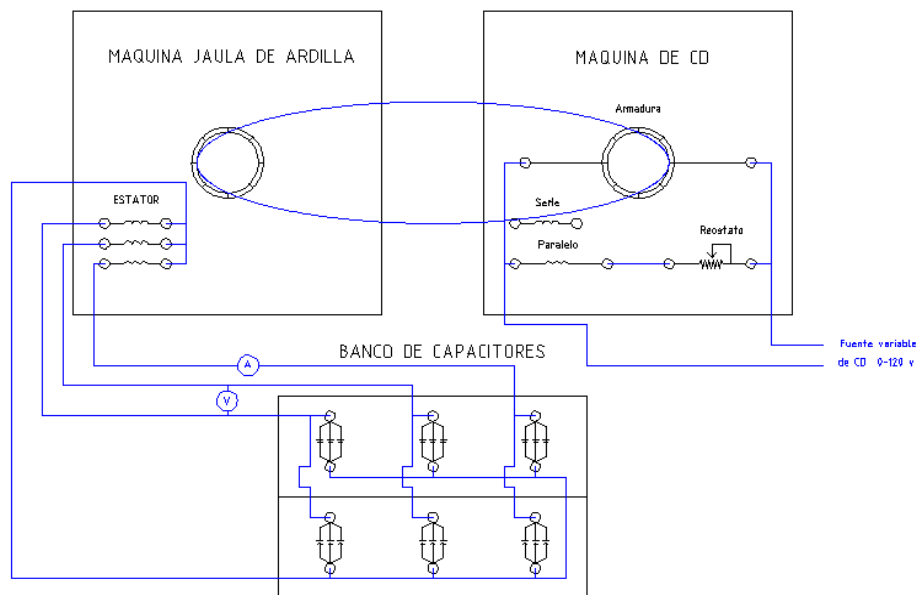


Figura 5.20 Conexión física del generador aislado jaula de ardilla de ¼ Hp.

Tabla 5.9 Valores obtenidos del generador aislado jaula de ardilla ¼ Hp.

$n_r$	$V_{f-f}$	$I_{línea}$	$P_{ent}$	$Q$	$fp$	$s$	$f_e$
1500	1.93	0.0054	0	-2	0	0.17	50
1550	2.3	0.0068	0	-3	0	0.14	52
1600	3	0.0093	0.3	-6	0.01	0.11	54
1650	72	0.2	2	-29	0.02	0.08	55
1700	140	0.47	2	-120	0.02	0.06	57
1750	186	0.68	2	-230	0.02	0.03	57
1780	208	0.76	3	-287	0.02	0.01	58
1800	225	0.84	4	-340	0.03	0.00	60
1850	257	0.98	10	-450	0.03	-0.03	61
1885	270	1.04	10	-500	0.05	-0.05	62

Donde:

- $n_r$  Velocidad del rotor en rpm
- $I_{línea}$  Corriente de alimentación generada en Amperios
- $V_{f-f}$  Voltaje generado de fase a fase en Volts
- $f_e$  Frecuencia generada del estator en Hz
- $Q$  Potencia reactiva consumida en VAR´s
- $P_{ent}$  Potencia de suministro en W
- $s$  Deslizamiento
- $fp$  Factor de potencia

La Figura 5.21, muestra la conexión física de una MIRD como generador aislado, donde la máquina motriz ayuda a la MIRD a vencer la velocidad de sincronismo, donde los valores de la Tabla 5.10, muestra los valores generados.

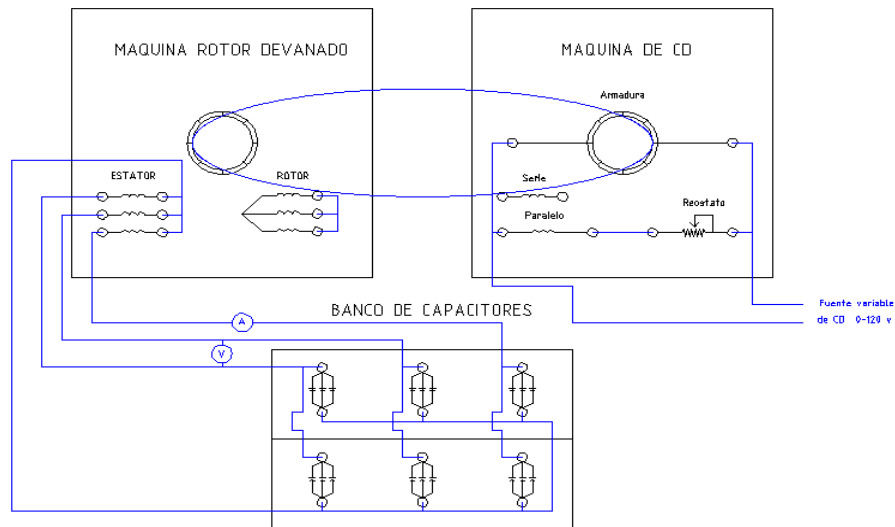


Figura 5.21 Conexión física del generador aislado rotor devanado ¼ Hp.

Tabla 5.10 Valores obtenidos del generador aislado rotor devanado ¼ Hp.

$n_r$	$V_{f-f}$	$I_{línea}$	$P_{ent}$	$Q$	$fp$	$s$	$f_e$
1500	1.1	0.0033	0	-1	-0.01 DPF	0.17	50
1550	1.4	0.0053	0	-1	-0.01 DPF	0.14	52
1600	1.6	0.0054	0	-2	-0.01 DPF	0.11	54
1650	2	0.0074	0	-3	-0.01 DPF	0.08	55
1700	115	0.41	1	-81	0.01	0.06	55
1750	161	0.6	3	-158	0.02	0.03	56
1800	185	0.72	5	-237	0.02	0.00	58
1840	208	0.83	7	-296	0.02	-0.02	59
1850	214	0.85	7	-309	0.02	-0.03	60
1900	234	0.953	10	-390	0.03	-0.06	61

Donde:

- $n_r$  Velocidad del rotor en rpm
- $I_{línea}$  Corriente generada de alimentación en Amperios
- $V_{f-f}$  Voltaje generado de fase a fase en Volts
- $f_e$  Frecuencia generada del estator en Hz
- $Q$  Potencia reactiva consumida en VAR's
- $P_{ent}$  Potencia de suministro en W
- $s$  Deslizamiento
- $fp$  Factor de potencia

De la Tabla 5.9 y de la Tabla 5.10, de los generadores de inducción aislada, sus valores característicos son similares en comportamiento por lo que se resume de manera general los siguientes puntos:

- a) El voltaje generado y frecuencia generada, no son controlables, ya que dependen de la velocidad del generador. Como se muestra en la Figura 5.22, para el voltaje generado y la Figura 5.23, para la frecuencia generada.
- b) La potencia generada y el factor de potencia, es cero o casi nula, ya que no presenta carga resistiva.
- c) La potencia reactiva es negativa, porque el generador de inducción tiende a consumir potencia reactiva, para excitar sus bobinas.
- d) La operación del generador tiende a obtener un deslizamiento negativo, y una inversión de giro del par generado.
- e) La grafica corriente-velocidad, no es lineal, ya que presenta una ligera curvatura.

- f) El generador aislado de rotor devanado, posee la característica de operar a más velocidad, que el generador aislado de jaula de ardilla.

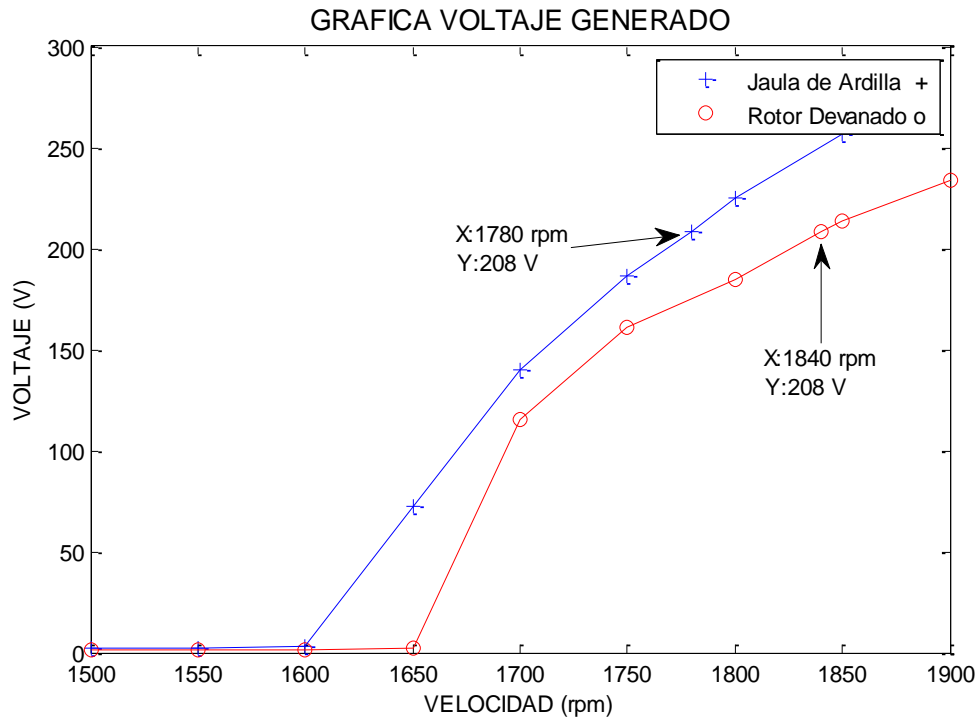


Figura 5.22 Gráfica voltaje generado de una MIJA y de una MIRD de ¼ Hp.

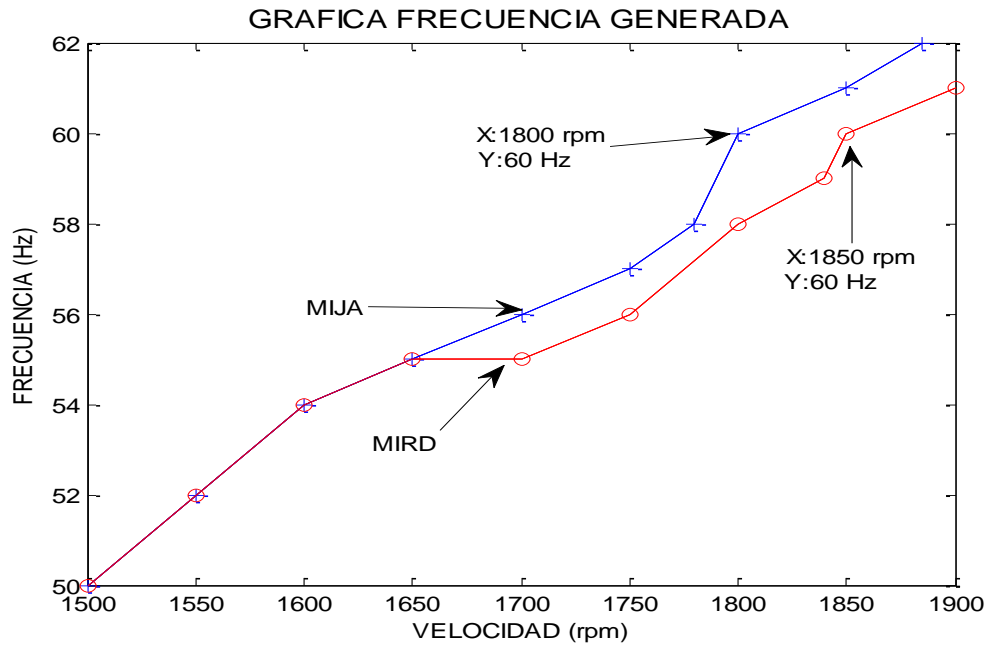


Figura 5.23 Gráfica frecuencia generada de una MIJA y de una MIRD de ¼ Hp.

## 5.6 Conclusiones generales

La información levantada puede variar, con la información que levante el lector, ya que existe el inconveniente de la calidad de alimentación de cada fase, consola, uso de la máquina, etc., donde la información recopilada en el presente capítulo, se encuentra analizada de forma cuidadosa, para su aprobación.

### 5.6.1 Conclusiones particulares

En las conclusiones particulares se muestra el comportamiento de la máquina de inducción, basado en la región de operatividad, donde se resume con las siguientes observaciones:

- Los motores de inducción no pueden girar a velocidad de sincronismo por sí mismos ya que necesitan un motor de arrastre conectado al motor de inducción.
- Debe producir el suficiente par, para vencer las pérdidas mecánicas del motor.
- Se observa que el motor de jaula de ardilla posee una corriente de arranque brusca en comparación con el motor de rotor devanado.
- El motor de rotor devanado posee la capacidad de agregar resistencias externas en el eje del rotor, con el fin de reducir la corriente de arranque.
- El fp nominal del motor de jaula de ardilla es de 0.875 y en vacío es de 0.175.
- El fp nominal del motor de rotor devanado es de 0.865 y en vacío es de 0.17.
- Si el rotor gira a velocidad de sincronismo no se genera el par motor.
- El par máximo equivale a 2 o 3 veces el par nominal y no puede ser excedido.
- El par de arranque es de 6.071 Nm y el par de desenganche es de 11.6 Nm, donde el par de arranque es ligeramente mayor al par de plena carga.
- Para frenar con rapidez el motor, se conmutan dos fases, es decir; se invierte la dirección de rotación del campo magnético.
- También se observa que las máquinas de inducción, cuando actúan como generadores, consumen potencia reactiva, por lo cual, es necesaria la implementación de dos bancos de capacitores, para que proporcione la potencia reactiva necesaria para la operatividad del generador y para que proporcione la potencia reactiva necesaria al sistema eléctrico.



- La máquina de inducción opera como generador cuando la velocidad del rotor es mayor de 1800 rpm. Y la dirección de giro del par inducido se invierte, convirtiendo la potencia mecánica en potencia eléctrica.
- El generador de inducción genera potencia real, al sistema después de sobrepasar la velocidad de sincronismo.
- La potencia máxima generada, depende de la corriente nominal como generador a la cual esta fabricada (1.5 A, 1/4 Hp).
- El voltaje generado y frecuencia generada en forma aislada, no es controlable, ya que dependen de la velocidad del generador.
- La potencia generada y el factor de potencia, es cero o casi nula, ya que no presenta carga resistiva.
- La potencia reactiva es negativa, porque el generador de inducción tiende a consumir potencia reactiva, para excitar sus bobinas.
- La operación del generador tiende a obtener un deslizamiento negativo, por la inversión de giro del par generado.
- El generador aislado de rotor devanado, posee la característica de operar a más velocidad, que el generador aislado de jaula de ardilla.

# Capítulo 6

## Conclusiones, observaciones y trabajos futuros

### 6.1 Conclusiones generales

El estator de una máquina de inducción, es el mismo que usa la máquina síncrona, donde la máquina de inducción posee características únicas en su rotor al no requerir de una corriente de excitación externa, como es el caso del motor síncrono, existiendo generalmente dos tipos de motores de inducción:

- Motor jaula de ardilla.
- Motor de rotor devanado.

En la actualidad las máquinas de inducción, son las máquinas más utilizadas en el ámbito industrial, alrededor del 80%, gracias a su bajo costo, facilidad de manejo, bajo mantenimiento, construcción simple y robustez, en el caso especial del motor de inducción de jaula de ardilla, ya que el motor de inducción de rotor devanado, rompe con dicha simplicidad, pero mejora la calidad de control de velocidad, par y eficiencia. Sosteniendo la operatividad fundamental que ha caracterizado a dichos motores, desde el siglo pasado, mejorando cada día más sus defectos, gracias a la ayuda de la tecnología de materiales y de la electrónica moderna.

En regimenes de operación de freno, motor y generador, se resume en función al deslizamiento como:

$$\text{Freno: } s > 1$$

$$\text{Motor: } \frac{1}{s} \geq 0; \frac{1-s}{s} \geq 0 \Rightarrow 0 \leq s \leq 1$$

$$\text{Generador: } s \leq 0$$

Se obtuvieron los parámetros del circuito equivalente, del motor jaula de ardilla, por medio de la prueba en vacío y la prueba de rotor bloqueado.

Se mostraron Figuras de las conexiones físicas y comportamientos característicos propios de cada región de operación, para una mejor comprensión, así como el anexo de tablas, que muestran los valores de operación de cada máquina en función de la velocidad.

### 6.1.1 Conclusiones particulares

- Los motores de inducción no pueden girar a velocidad de sincronismo por sí mismos ya que necesitan un motor de arrastre conectado al motor de inducción.
- Debe producir el suficiente par, para vencer las pérdidas mecánicas del motor.
- Se observa que el motor de jaula de ardilla posee una corriente de arranque brusca en comparación con el motor de rotor devanado.
- El motor de rotor devanado posee la capacidad de agregar resistencias externas en el eje del rotor, con el fin de reducir la corriente de arranque.
- El factor de potencia (fp) mejora con la potencia suministrada, pasando por un fp bajo a un valor relativamente alto para el funcionamiento nominal del motor de inducción.
- El par inducido del motor es cero a velocidad de sincronismo.
- Si el rotor gira a velocidad de sincronismo no se genera el par motor.
- El par máximo equivale a 2 o 3 veces el par nominal y no puede ser excedido.
- Para frenar con rapidez el motor, se conmutan dos fases, es decir; se invierte la dirección de rotación del campo magnético.
- La potencia máxima que debe suministrarse al motor en estas condiciones, debe de ser por un periodo de tiempo corto ya que corre el peligro de destrucción del motor por temperatura, y aumenta la velocidad que suministra el par de desenganche (precaución).
- Los rangos de voltaje y frecuencia *No siempre están disponibles* para ser útiles como generadores.
- Los generadores de inducción, consumen potencia reactiva, por lo que, es necesaria la implementación de dos bancos de capacitores, uno que le proporcione la potencia reactiva necesaria para la operatividad del generador y otro banco de capacitores que proporcione potencia reactiva al sistema eléctrico.
- La máquina de inducción opera como generador cuando la velocidad del rotor es mayor de 1800 rpm. Y la dirección de giro del par inducido se invierte, convirtiendo la potencia mecánica en potencia eléctrica.
- El deslizamiento cambia de positivo a negativo al sobrepasar la velocidad de sincronismo (1800 rpm).

- El generador de inducción genera potencia real, al sistema después de sobrepasar la velocidad de sincronismo.
- La potencia máxima generada, depende de la corriente nominal como generador a la cual esta fabricada (1.5 A=1/4 Hp).
- El voltaje generado y frecuencia generada en forma aislada, no es controlable, ya que dependen de la velocidad del generador.
- La potencia generada y el factor de potencia en forma aislada, es cero o casi nula, ya que no presenta carga resistiva.
- La potencia reactiva es negativa, porque el generador de inducción tiende a consumir potencia reactiva, para la excitación de sus bobinas.

## **6.2 Observaciones para un buen levantamiento de información**

Para una buena obtención de información de la máquina de inducción, trabajando como motor, generador y autoexcitado:

- Al realizar las diferentes conexiones y/o cambio de conexión, mantenga la fuente de alimentación apagada.
- Al usar la banda, es necesario que se encuentre bien ajustada, ya que puede no estar bien ajustada a su respectiva flecha.
- Si la banda, aplica mucha fuerza a la flecha, y esta toca la protección de plástico externa, es necesario, realizar la práctica con la protección externa sobrepuesta, checa con tu profesor, ya que puede ocasionar una inercia en la flecha y ocasiona un mal levantamiento de información.
- Realice una segunda observación en las conexiones antes de energizar y/o consulta con el profesor.
- Cuando realices las conexiones, es necesario que el sentido de giro de la flecha de la máquina de inducción sea en sentido de las manecillas del reloj, si es en sentido contrario a las manecillas, invierte dos fases en la alimentación.
- Para variar la velocidad del generador, es conveniente ajustar el reóstato a la velocidad deseada.

- El primotor, no debe sobrepasar sus valores nominales, por lo que se sugiere al lector alimentar al primotor con una fuente variable CD (120 V). En el caso del uso de una máquina de corriente directa como promotor.
- Si los valores obtenidos como en el caso del voltaje generado, son valores pequeños (voltajes menores de 9 V), entonces existe un problema con el reóstato del primotor, en el cual se tendrá que ajustar el falso contacto en sus terminales.
- Si va a levantar corrientes muy pequeñas con el uso de multímetros digitales (fluke) al grado de los microampers, tenga precaución al ir aumentando la corriente, ya que pueden fundir el fusible de protección
- Para un generador aislado los valores de las tablas obtenidas en el Subtema 5.4.2, se obtienen de una velocidad máxima a una velocidad mínima, ya que presenta un fenómeno, el reóstato de campo del primotor, el cual arroja valores erróneos, si se desean obtener de la forma acostumbrada.
- Del generador aislado, el neutro de los capacitores va cortocircuitado con el neutro del estator del generador de inducción,

### **6.3 Trabajos futuros**

Después de realizar las pruebas de la máquina de inducción en sus diferentes modalidades, sería de mucha utilidad que el lector realice pruebas en condición de arranque, y el uso de resistencias externas en el caso particular de la máquina de rotor devanado.

Donde en la actualidad existen muchas empresas que se dedican al proceso de construcción de máquinas de inducción, mejorando día a día, existiendo nuevas aplicaciones a necesidades que exige la sociedad y sociedad industrial a través de los años, en sus diferentes aplicaciones como:

- Máquinas de inducción con doble jaula de ardilla y de ranura profunda.

Los motores de doble jaula poseen dos jaulas concéntricas construidas de tal manera que la jaula externa presenta una pequeña autoinducción (debida a los flujos de dispersión) y una elevada resistencia, mientras que la interna presenta baja resistencia y alta autoinducción.

Los motores de ranura profunda tienen una jaula cuyos conductores tienen una forma tal que su parte inferior presenta pequeña resistencia y alta autoinducción y la

parte superior presenta alta resistencia y baja autoinducción. Su comportamiento, por tanto, es similar al de los motores de doble jaula: en el arranque la corriente se concentra en la parte superior de los conductores (de alta resistencia) y en marcha normal la corriente circula preferentemente por la parte inferior, consiguiéndose así un elevado par de arranque.

- Hermanamiento Motor-Generador.

El hermanamiento es el acople mecánico entre la máquina motriz, que puede ser una turbina eólica, hidráulica, de vapor o cualquier otro tipo de motor que proporcione la energía mecánica de entrada  $P_m$ , y el generador. Este acople debe ser efectuado de manera que el movimiento sea consistente y que el torque de entrada del motor sea mayor al torque electromagnético del generador en condiciones nominales de máxima eficiencia.

- Regulador de frecuencias

La regulación por variación de la frecuencia consiste en variar la frecuencia de las corrientes del estator con lo que se modifica la velocidad de sincronismo de la máquina.

- Uso de la electrónica moderna y electrónica de potencia para la eficiencia de las máquinas de inducción.

Esta área de la electrónica-máquina de inducción, es un área poco explorada e interesante ya que se puede solucionar muchos problemas o desventajas que han ido sumándose a través de los años, como es el caso de la regulación de tensión, deslizamiento y frecuencia generada.

- Automatización de las máquinas de inducción, con el uso del control de máquinas, con controles lógicos programables (PLC's).

Con el avance de la tecnología moderna, surgen los PLC's programables, que ayudan a operar las diferentes máquinas de forma automática, este apartado es muy importante, ya que en la actualidad, las máquinas de inducción industrial tiende a hacer automático.

Siendo estos tres últimos puntos, los más probables a investigar ya que se cuenta con el recuso y material adecuado, para un buen levantamiento de información.

# Apéndice

## Apéndice A. Diseño de motores de inducción

En la actualidad los fabricantes están produciendo nuevas líneas de motores de inducción de alta eficiencia, y están logrando una participación creciente en el mercado de los motores de inducción, se describe en el Capítulo 5 los parámetros de la reactancia del estator y del rotor. Para aumentar la eficiencia de estos motores, se usan estas técnicas:

1. Se utiliza más cobre en los devanados del estator, para reducir las pérdidas en el cobre.
2. Las longitudes de los núcleos del rotor y del estator se incrementan para reducir la densidad del flujo magnético en el entrehierro de la máquina. Esto reduce la saturación magnética de la máquina y disminuye las pérdidas en el núcleo.
3. Se utiliza más acero en el estator de la máquina, lo cual permite transferir mayor cantidad de calor hacia fuera del motor y reducir su temperatura de operación. El ventilador del rotor se rediseña para reducir las pérdidas por rozamiento en el aire.
4. En el estator se utiliza acero especial de alto grado eléctrico y bajas pérdidas por histéresis.
5. El acero, de muy alta resistividad interna, se laminan en calibres especialmente delgados. Ambos efectos tienden a reducir las corrientes parásitas en el motor.
6. El motor es maquinado cuidadosamente para producir un entrehierro uniforme que reduce las pérdidas dispersas en el motor.

Además de las técnicas generales descritas, cada fabricante posee sus propias técnicas para mejorar la eficiencia de los motores.

## **Apéndice B. Aspectos sobresalientes de las clases de diseños**

**Diseño clase A.** Los motores con diseño clase A son los motores con diseño común, con un par de arranque normal, una corriente de arranque normal y deslizamiento bajo. A plena carga debe tener un deslizamiento menor al 5 por ciento y debe ser menor que el de un motor de clase B. El par máximo de salida es de 200 a 300 por ciento del par a plena carga y se presenta a un deslizamiento bajo (menor que 20 por ciento). El par de arranque para diseños de esta clase es como mínimo el par nominal para motores grandes y es igual a 200 por ciento o más que el par nominal para motores pequeños. El principal problema de este tipo de máquinas es que su corriente de conexión o de arranque es extremadamente alta, las corrientes de arranque típicas pueden ser de 500 a 800 por ciento de la corriente nominal. En tamaños superiores a 7.5 hp es necesario utilizar con estos motores alguna forma de reducción en el voltaje de alimentación para evitar, durante el arranque, problemas de caídas de voltaje en las líneas a las que se encuentra conectado el motor. En épocas pasadas los motores de clase A fueron los más comunes para todas las aplicaciones desde 7.5 hp, hasta aproximadamente 200 hp; sin embargo últimamente y en muchos casos, vienen siendo remplazados por motores de clase B. Algunas aplicaciones típicas de estos motores son: impulso de ventiladores, bombas, tornos y otras máquinas herramientas.

**Diseño clase B.** Los motores con diseño clase B tienen un par de arranque normal, corriente de arranque pequeña y deslizamiento bajo. Estos motores producen aproximadamente el mismo par de arranque que los motores de clase A, con una corriente alrededor del 25 por ciento menor. El máximo de salida es mayor o igual a 200 por ciento del par a carga nominal, pero es menor que el de clase A, debido a su mayor reactancia en el rotor. Sin embargo su deslizamiento es relativamente bajo (menor que 5 por ciento) a plena carga. Las aplicaciones son similares a las de clase A, pero se prefieren los de clase B por su menor corriente de arranque. En instalaciones modernas los motores de clase B han reemplazado a los motores de clase A.

**Diseño clase C.** Los motores con diseño de clase C tienen un alto par de arranque con corriente de arranque pequeña y operan con deslizamiento bajo (menor que 5 por ciento) a plena carga. El par máximo de salida es ligeramente menor que el de los



motores de clase A, pero su par de arranque es superior al 250 por ciento del par a plena carga. Estos motores se fabrican con rotores de doble jaula, lo cual los hacen más costosos que los de las clases anteriores. Se utilizan con cargas que requieren alto par en el arranque, tales como bombas cargadas, compresores y bandas transportadoras.

**Diseño clase D.** Los motores de diseño de clase D tienen un par de arranque muy alto (275 por ciento más del par 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 más pequeñas y hechas con material de mayor resistencia. La alta resistencia del rotor hace que el valor máximo del par se presente a velocidades muy bajas. Incluso el mayor par es factible que ocurra a velocidad cero (deslizamiento 100 por ciento). A plena carga, estos motores tienen deslizamiento más grande, dada la resistencia del rotor. Su valor típico está entre el 7 y 11 por ciento pero puede llegar a ser hasta 17 por ciento o más. Estos motores se utilizan en aplicaciones en las que se necesita acelerar cargas con inercias extremadamente altas, especialmente volantes grandes, taladros, prensas y cizallas. En estos casos el motor acelera gradualmente un volante hasta llevarlo a velocidad suficiente con la cual se maneja el accionamiento. Después de una operación del accionamiento del motor vuelve a acelerar el volante durante un periodo de tiempo suficientemente prolongado, hasta la siguiente operación.

Además de estas cuatro clases de diseño, NEMA admite los diseños clase E y clase F, los cuales se conocen como motores de inducción de arranque suave. Estos diseños se distinguen porque tienen muy bajas corrientes de arranque y se utilizan con cargas de pequeño par de arranque y en situaciones en las cuales las corrientes de arranque constituyen todo un problema. Actualmente, estos diseños se consideran obsoletos.

## **Referencias**

### **[Aller, 2007]**

Aller José Manuel. Máquinas Eléctricas Rotativas: Introducción a la teoría general. Venezuela, Equinoccio, 2007.

### **[Cathey, 2002]**

Cathey Jimmie J. Máquinas Eléctricas “Análisis y diseño aplicando Matlab”, México, Mc Graw Hill, 2002.

### **[Chapman, 2005]**

Chapman Stephen J. Máquinas Eléctricas, México, Mc Graw Hill, 2005.

### **[Chávez, 2006]**

Chávez, Ismael, Manual “Introducción a Matlab”, México, 2006.

### **[Fitzgerald et al, 2003]**

Fitzgerald A. E, Kingsley Charles Jr, Umans Stephen D, Máquinas Eléctricas, México, Mc Graw Hill, 2003.

### **[Gourishankar, 1990]**

Gourishankar V. Conversión de energía electromecánica, México, Alfaomega, 1990.

### **[Gray, 1997]**

Gray Clifford B. Máquinas Eléctricas y sistemas accionadores, México, Alfaomega, 1997.

### **[Gutiérrez, 2009]**

Gutiérrez H. Humberto, (2009). “Modos de operación de la máquina síncrona, obtenidos de forma experimental”, Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería Eléctrica, UMSNH., México.

**[Milano, 2010]**

Milano, Federico, “Máquina asíncrona o de inducción”, España, 2010.

**[Mondragón, 2007]**

Mondragón, Manual de prácticas, serie 199, Corporación alecop, España, 2007.

**[Richardson y Caisse, 2008]**

Richardson Donald V. y Caisse Arthur J. Jr, Máquinas Eléctricas Rotativas y Transformadores, México, Prentice Hall, 2008.

**[Rodríguez, 2008]**

Rodríguez P., Miguel Ángel, “Máquinas asíncronas”, Colección: “Electrotecnia para ingenieros no especialistas”, España, 2008.

**[Sanz, 2002]**

Sanz Javier F., Máquinas Eléctricas, España, Prentice Hall de Pearson, 2002.

**[Sanz et al, 2011]**

Sanz M., Llombart, A., Mur, J., Sierra, R., “Sistema de medida de calidad de red para parques eólicos”, España, 2011.

**[Shi et al, 1999]**

Shi, K., Chan, T., Won Y., Ho, S., “Modelling and simulation of the three-phase induction motor using simulink”, Gran Bretaña, 1999.

**[Vargas et al, 2003]**

Vargas Luis, Romo Jorge y Del Valle Yamille, Apuntes usados en el curso de Conversión Electromecánica de la Energía, Chile, 2003.

**[Wildi, 2007]**

Wildi, Theodore. Máquinas eléctricas y sistemas de potencia, México. Prentice Hall de Pearson, 2007.