

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA**

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



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

POR

ING. JESUS GUADALUPE CASTAÑEDA MARROQUIN

T E S I S

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

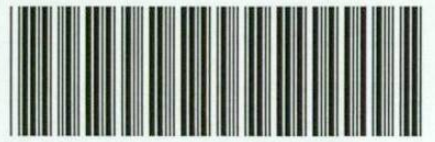
SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. DICIEMBRE DE 1998

TM
TK145
C 37
11

ESTUDIO DE LAS MAQUINAS ELÉCTRICAS PARA EL

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

J. G. C. M.



1080087055

9527

1967

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



ESTUDIO DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS PARA EL
INGENIERO EN ELECTRONICA

POR

INGE. JESUS GUADALUPE CASTAÑEDA MALROQUIN

T E S I S

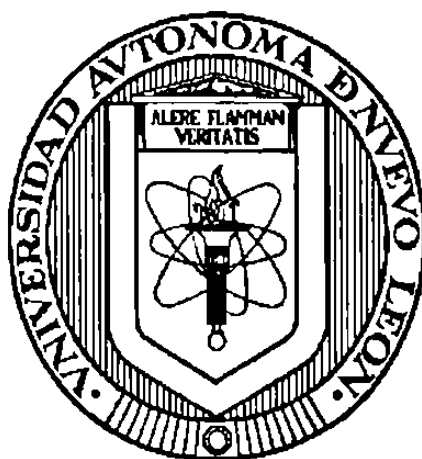
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERIA EN ELECTRONICA
CON ESPECIALIDAD EN ELECTRONICA

TAM
T
C37
S

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



ESTUDIO DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS PARA EL
INGENIERO EN ELECTRONICA

POR

ING. JESUS GUADALUPE CASTAÑEDA MARROQUIN

T E S I S

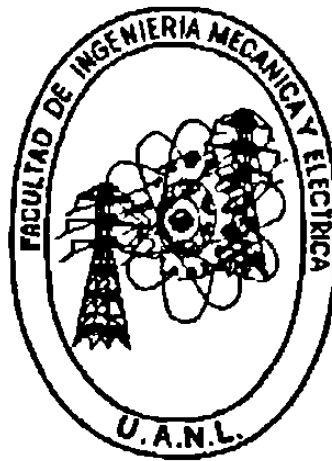
En opción al Grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica
Con especialidad en Electrónica

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

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



ESTUDIO DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS PARA EL
INGENIERO EN ELECTRONICA

POR

ING. JESUS GUADALUPE CASTAÑEDA MARROQUIN

T E S I S

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

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



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

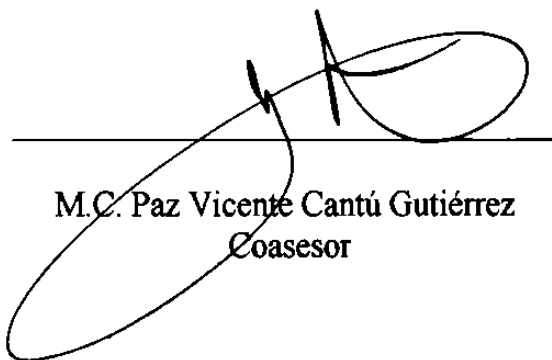
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

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

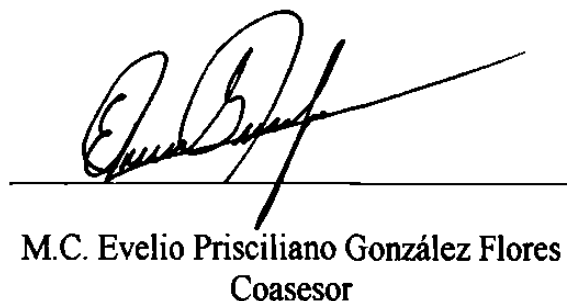
El Comité de Tesis



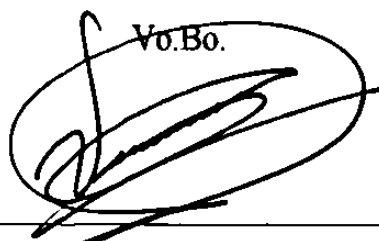
M.C. Luis Manuel Camacho Velázquez
Asesor



M.C. Paz Vicente Cantú Gutiérrez
Coasesor



M.C. Evelio Prisciliano González Flores
Coasesor



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

PROLOGO

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

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

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

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

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

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

CONTENIDO

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

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

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

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

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