

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



DESARROLLO DE UN CURSO DE CONTROL  
ELECTRONICO DE MOTORES

POR

GUADALUPE IGNACIO CANTU GARZA

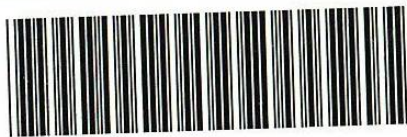
TESIS

EN OPCION AL GRADO DE  
MAESTRIA EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERIA ELECTRICA  
CON ESPECIALIDAD EN CONTROL.

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.  
NOVIEMBRE DE 1997

DESARROLLO DE UN CURSO DE CONTROL  
ELECTRONICO DE MOTORES

TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
1997  
C36



1020121317

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



DESARROLLO DE UN CURSO DE CONTROL  
ELECTRONICO DE MOTORES

POR

GUADALUPE IGNACIO CANTU GARZA

T E S I S

EN OPCION AL GRADO DE  
MAESTRIA EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERIA ELECTRICA  
CON ESPECIALIDAD EN CONTROL

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.  
NOVIEMBRE DE 1997

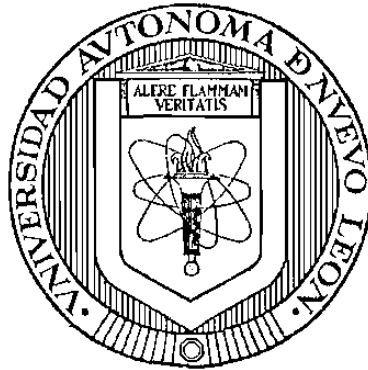


FONDO  
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**DESARROLLO DE UN CURSO DE  
CONTROL ELECTRONICO DE MOTORES**

**POR**

**GUADALUPE IGNACIO CANTÚ GARZA**

**TESIS**

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

0119-39360

TM  
Z5853  
.M2  
FINE  
1997  
C36

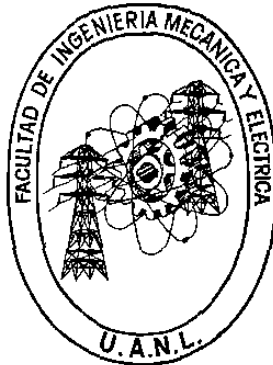


FONDO TESIS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**DESARROLLO DE UN CURSO DE  
CONTROL ELECTRONICO DE MOTORES**

**POR**

**GUADALUPE IGNACIO CANTU GARZA**

**TESIS**

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



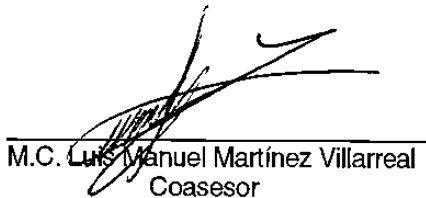
**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

Los miembros del comite de tesis recomendamos que la tesis: "DESARROLLO DE UN CURSO DE CONTROL ELECTRONICO DE MOTORES", realizada por el ING. GUADALUPE IGNACIO CANTU GARZA sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Control

El Comite de Tesis



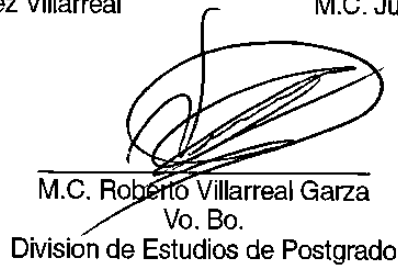
M.C. Luis Manuel Camacho Velázquez  
Asesor



M.C. Luis Manuel Martínez Villarreal  
Coasesor



M.C. Juan Diego Garza González  
Coasesor



M.C. Roberto Villarreal Garza  
Vo. Bo.  
Division de Estudios de Postgrado

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, N. L. a 11 de Noviembre de 1997

# INDICE

	Página
PROLOGO	1
SINTESIS	2
CAPITULO 1	
INTRODUCCION	4
1.1 DESCRIPCION DEL CURSO	5
1.2 METODOLOGIA DEL CURSO	6
1.2.1 Elementos del Programa	6
1.2.2 Programa del Curso de Control Electrónico de Motores	8
CAPITULO 2	
ACCIONAMIENTOS PARA MOTORES	15
2.1 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE ACCIONAMIENTO	15
2.2 EL SISTEMA MECANICO	16
2.2.1 Compresor	18
2.2.2 Bomba Centrífuga ó Ventilador	18
2.2.3 Accionamiento a Potencia Constante	19
2.2.4 Accionamiento para Transporte	20
2.2.5 Grúas	23
2.3 CARACTERISTICAS REQUERIDAS EN UN ACCIONAMIENTO	24
2.3.1 Estabilidad	25

	Página
2.3.2 Velocidad Ajustable	26
2.3.3 Cambios de Velocidad	27
2.4 FUENTE DE POTENCIA	30
2.4.1 Fuentes de Corriente Alterna	30
2.4.2 Fuentes de Corriente Directa	30
2.5 CONVERTIDORES Y MOTORES	31
CAPITULO 3	
CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA	35
3.1 REGULACION DE VELOCIDAD	35
3.1.1 Regulación Reostática (Potenciométrica)	37
3.1.2 Regulación por Campo Magnético (Flujo)	37
3.1.2 Regulación por Voltaje de Armadura	38
3.2 SELECCION DEL MOTOR	39
3.3 LIMITES DE OPERACION	41
3.4 DINAMICA DEL CONJUNTO MOTOR - CARGA	43
3.5 CONTROL DE VELOCIDAD DE LAZO CERRADO	48
CAPITULO 4	
CONVERTIDORES DE FASE CONTROLADA	55
4.1 CONVERTIDORES DE FASE CONTROLADA (RECTIFICADORES CONTROLADOS)	56
4.2 CONVERTIDORES MONOFASICOS DE MEDIA ONDA	57
4.3 CONVERTIDORES MONOFASICOS DE ONDA COMPLETA	59
4.3.1 Circuito Equivalente y Ecuaciones para Convertidores Monofásicos de Onda Completa - Control Completo	66
4.3.2 Circuito Equivalente y Ecuaciones para Convertidores Monofásicos de Onda Completa - Medio Control	75

	Página
4.3.3 Regeneración con Diodo de Rueda Libre	79
4.4 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE LOS CONVERTIDORES	82
4.4.1 Convertidores de Medio Control	83
4.4.2 Convertidores de Control Completo con Rodada Libre	84
4.5 FACTOR DE POTENCIA	84
4.5.1 Convertidores de Control Competo	85
4.5.2 Convertidores de Medio Control	86
4.6 CONVERTIDORES TRIFASICOS DE MEDIA ONDA	86
4.7 CONVERTIDORES TRIFASICOS DE ONDA COMPLETA	87
4.7.1 Convertidor Trifásico de Onda Completa - Medio Control	88
4.7.2 Convertidor Trifásico de Onda Completa - Control Completo	90
4.7.2.1 Convertidor Trifásico de Onda Completa con Diodo de Rueda Libre	93
4.7.2.2 Convertidor Trifásico de Onda Completa con Rueda Libre y Regeneración	98
4.8 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE LOS CONVERTIDORES TRIFASICOS	101
4.8.1 Convertidor Trifásico de Onda Completa-Control Completo	101
4.8.2 Convertidor Trifásico de Onda Completa-Control Completo con Diodo de Rueda Libre	101
4.8.3 Convertidor Trifásico de Onda Completa con Rodada Libre y Regeneración	102
4.9 POTENCIA EN LOS CIRCUITOS DE FUENTE Y CARGA	103
4.9.1 Convertidor Trifásico de Onda Completa sin Diodo de Rueda Libre	104
4.9.2 Convertidor Trifásico de Onda Completa con Diodo de Rueda Libre	104
4.10 CONVERTIDORES DUALES	106

	Página
4.10.1 Convertidor Dual con Corriente Circulante	107
4.10.2 Convertidor Dual con Banda Muerta	109
4.10.3 Convertidor Dual con Lógica de Inversión	110
4.11 CONVERTIDORES DUALES PARA CONTROL POR CAMPO	111
CAPITULO 5	
CONVERTIDORES DE C-D A C-D	115
5.1 PRINCIPIO DE OPERACION	115
5.2 CONVERTIDORES DE C-D A C-D TIPO A	117
5.3 CONVERTIDORES DE C-D A C-D TIPO B	124
5.4 CONVERTIDORES DE C-D A C-D TIPO C	126
5.5 CONVERTIDORES DE C-D A C-D TIPO D	127
5.6 CONVERTIDORES DE C-D A C-D TIPO E	129
5.7 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE LOS TROCEADORES	133
5.8 CONVERTIDORES DE C-D A C-D CON TRANSISTORES	134
5.9 CONVERTIDORES DE C-D A C-D CON TIRISTORES	134
CAPITULO 6	
REGULADORES PARA MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA	137
6.1 FUNCIONES DE UN REGULADOR PARA MOTORES DE C-D	137
6.2 COMPONENTES DE UN REGULADOR PARA MOTORES DE C-D	140
6.3 TIPOS DE REGULADORES PARA MOTORES DE C-D	141
6.3.1 Regulación con Lazos Convergentes	141
6.3.2 Regulación Lineal con Lazos Múltiples (Sistema en Cascada)	144
6.3.3 Regulación con Controladores en Paralelo	146
6.4 COMPONENTES DE LOS CIRCUITOS DE CONTROL	147

## INDICE

	Página
6.4.1 Controladores	148
6.4.2 Circuitos de Disparo	150
6.4.2.1 Regulación del Desfasamiento	150
6.4.2.2 Funciones Secundarias de los Circuitos de Disparo	153
6.4.3 Módulos de Potencia	153
6.5 DISEÑO DE UN REGULADOR LINEAL CON LAZOS MULTIPLES	155
6.5.1 Lazo de Corriente	155
6.5.2 Lazo de Velocidad	162
CAPITULO 7	
MOTORES DE INDUCCION	169
7.1 CONCEPTOS BASICOS DEL MOTOR DE INDUCCION	169
7.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR DE INDUCCION	171
7.2.1 Modelo del Circuito del Rotor	171
7.2.2 Circuito Equivalente Definitivo	172
7.3 PAR Y POTENCIA EN UN MOTOR DE INDUCCION	173
7.4 CARACTERISTICA PAR - VELOCIDAD	176
7.5 CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTORES DE INDUCCION	177
7.5.1 Variación de la Resistencia del Circuito de Rotor	177
7.5.2 Regulación de la Potencia de Deslizamiento	179
7.5.3 Control del Voltaje de Estator	181
7.5.4 Control de la Frecuencia de la Fuente	181
CAPITULO 8	
CONTROL DE VELOCIDAD DE LOS MOTORES DE INDUCCION POR EL VOLTAJE DE ESTATOR	187
8.1 CONFIGURACIONES CON CONTROLADORES DE C-A	187

	Página
8.2 REVERSIBILIDAD DEL PAR Y LA VELOCIDAD	189
8.3 CONTROL DE VOLTAJE DE C-A POR INTERRUPCION DE ALTA FRECUENCIA	191
8.4 APLICACIONES	193
CAPITULO 9	
CONTROL DE VELOCIDAD DE LOS MOTORES DE INDUCCION POR LA ENERGIA DE DESLIZAMIENTO	201
9.1 OPERACION DEL SISTEMA	201
9.2 PREDICCIONES DE FUNCIONAMIENTO	205
9.3 CONTROL DE LAZO CERRADO (REGULADOR)	210
CAPITULO 10	
CONTROL DE VELOCIDAD DE LOS MOTORES DE INDUCCION A FRECUENCIA Y VOLTAJE VARIABLES	213
10.1 COMBINACIONES DE CONVERTIDORES	213
10.2 INVERSORES FUENTE DE VOLTAJE TRIFASICOS	215
10.2.1 Inversor con Modulación de Ancho de Pulso	216
10.2.2 Comparación de los Sistemas de Accionamiento	219
10.2.3 Relaciones Básicas y Métodos de Control	219
10.3 FLUJO EN EL ENTREHIERRO DE AMPLITUD CONSTANTE	220
10.3.1 Características Aproximadas del Par y la Velocidad	225
10.3.2 Sistemas de Control para Densidad de Flujo Constante en el Entrehierro	227
10.4 OPERACION CON CAMPO DEBIL	228
10.5 SISTEMA DE CONTROL PARA CAMPO DEBIL	231
10.6 RELACION VOLTAJE A FRECUENCIA CONSTANTE	232
10.6.1 Control Retroalimentado con la Razón Volts / Hertz Constante	233

	Página
10.6.2 Razón Volts / Hertz Constante con Regulación del Deslizamiento	234
10.7 REGULACION INDEPENDIENTE DE PAR Y FLUJO	234
CAPITULO 11	
CONTROL DE VELOCIDAD DE LOS MOTORES DE INDUCCION A FRECUENCIA Y CORRIENTE VARIABLES	239
11.1 COMBINACIONES DE CONVERTIDORES	239
11.2 INVERSORES TIPO FUENTE DE CORRIENTE	240
11.3 OPERACION DE UN MOTOR DE INDUCCION CON UNA FUENTE DE CORRIENTE DE FRECUENCIA VARIABLE	243
11.3.1 Relaciones Básicas	247
11.3.2 Control de la Frecuencia del Rotor	249
11.4 OPERACION CON CAMPO DEBIL A VELOCIDAD ALTA	253
CAPITULO 12	
CONCLUSIONES	259
BIBLIOGRAFIA	261
LISTA DE FIGURAS	263
LISTA DE TABLAS	271
RESUMEN AUTOBIOGRAFICO	272



# PROLOGO

En los últimos años, las instituciones de educación superior en México, han realizado esfuerzos para instrumentar un sistema de planeación y evaluación de este nivel educativo, como una respuesta al proceso de globalización que se vive actualmente. La educación, cada día más y en forma acelerada y sistemática, debe asumir un papel protagónico ante este proceso de cambio que afecta al mundo y que alcanza a todas las esferas de la actividad humana.

Con el fin de impulsar un desarrollo armónico y fundamentado, la educación superior mexicana ha adoptado la planeación integral como instrumento idóneo para responder a las demandas sociales y lograr la articulación, el equilibrio y la coordinación que le permitan dar una respuesta más racional y efectiva. La finalidad de estos procesos es el mejoramiento de la calidad, incluidos los resultados del quehacer académico.

Si además se adhiere el principio de que el mundo se globaliza y que ya no se puede ser una isla, entonces, ya no se trata de determinar como formar profesionistas en una región o país determinado, sino como formarlos para el mundo. Por eso, los futuros ingenieros deberán estar preparados para ser transferibles, es decir, que si no trabajan aquí, lo harán en alguna otra parte de la economía global. Y aunque no fuera así, igual deben formarse de este modo. Porque para poder competir, los nuevos profesionistas deberán de estar capacitados para construir productos con los estándares que se están usando en el mundo.

Con la finalidad de participar en el conjunto de actividades dirigidas a la formación de mejores profesionales que constituyen el plan de estudios de la carrera de Ingeniero en Control y Computación y el plan de estudios de la carrera de Ingeniero Electricista de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León; se elaboró esta tesis en la que se desarrolla el programa de la asignatura de "Control Electrónico de Motores", que forma parte de los planes de estudios mencionados, detallando los objetivos, contenidos y criterios de evaluación, y que incluye además, la elaboración de los apuntes que forman el cuerpo principal de la asignatura y con los que se pretende constituir un texto para este curso.

# SINTESIS

Esta tesis presenta un curso completo de Control Electrónico de Motores, asignatura que forma parte de la curricula de la carrera de Ingeniero en Control y Computación; así como de la carrera de Ingeniero Electricista, que incluye el programa del curso y los apuntes del mismo.

Dichos apuntes fueron elaborados con ejemplos numéricos , así como con resúmenes y problemas propuestos en cada capítulo, con el propósito de que sirvan de texto para el curso. Se elaboraron también unos acetatos de estos apuntes para hacer que el desarrollo de la clase sea más dinámica permitiendo un rápido avance y una mayor cobertura de temas comparado con el método tradicional.

El propósito de estos apuntes es el de describir y analizar los métodos y las técnicas empleadas para controlar la operación de los motores eléctricos de corriente directa y de corriente alterna; así como los principios de operación de los dispositivos utilizados para ello. El material que los compone proviene de textos, publicaciones técnicas y manuales de fabricantes; a los que se hace mención en la bibliografía. Se recomienda la consulta de estas referencias si se desea obtener mayores detalles sobre algún tema en particular.

En el Capítulo 2, se establece un panorama general sobre los sistemas de accionamiento para el control de motores eléctricos. Se definen los componentes de los mismos y el procedimiento para la selección de cada uno de ellos.

En el Capítulo 3, se describen y analizan los métodos para regular la velocidad de un motor de C-D, se establecen los parámetros de los que depende ésta y se hace un análisis dinámico del motor como lazo abierto y como lazo cerrado.

La descripción, análisis y diseño de los sistemas de potencia usados para controlar la velocidad de los motores de C-D, corresponde a los Capítulos 4 y 5. En primer lugar, se describen, analizan y diseñan los rectificadores controlados o convertidores de fase controlada empleados como medios para proveer de la potencia necesaria a los motores de C-D cuando la fuente disponible es de C-A y en segundo lugar, se estudian los troceadores o convertidores de C-D a C-D empleados cuando la fuente es de C-D.

En el Capítulo 6, se describen los distintos arreglos de sistemas reguladores (sistemas de control retroalimentados) empleados para controlar la operación de los motores de C-D. Se reune

la información de los capítulo previos para constituir estos sistemas y se establecen algunos métodos para diseñar los controladores de estos sistemas reguladores.

En el Capítulo 7, se establecen los conceptos básicos de los motores de inducción, se obtienen las ecuaciones que determinan su funcionamiento y se describen los métodos empleados para controlar su velocidad: por medio de la regulación de la potencia de deslizamiento, por medio del control del voltaje de estator y por medio de la frecuencia de la fuente, tanto por control de voltaje como por control de corriente.

El análisis detallado de los métodos de control de velocidad de los motores de inducción corresponde a los Capítulos 8, 9, 10 y 11. Además en estos capítulos, se describen algunas aplicaciones típicas para cada uno de estos métodos y algunos sistemas reguladores.