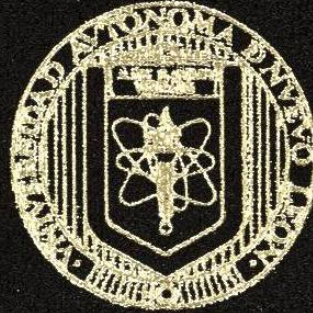


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



PROPUESTA DE MATERIAL DE ESTUDIO PARA LAS  
MATERIAS DE TEORIA DE CONTROL I Y II QUE IMPARTEN  
EN LA EIME DE LA UA DE C.

TESIS

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

QUE PRESENTA

FRANCISCO LAZARO DE LUNA SANMIGUEL

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE DE 1996



PROPUESTA DE MATERIAL DE ESTUDIO PARA LAS  
MATERIAS DE TEORIA DE CONTROL I Y II QUE SE IMPARTEN  
EN LA EIME DE LA UA DE C.

TM

Z5853

.M2

FIME

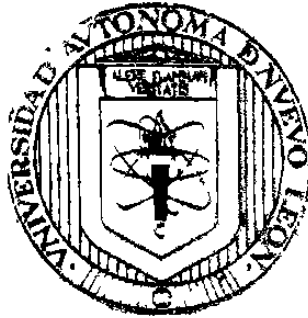
1996

L8



1020119015

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



PROPUESTA DE MATERIAL DE ESTUDIO PARA LAS  
MATERIAS DE TEORIA DE CONTROL I Y II QUE IMPARTEN  
EN LA EIME DE LA UA DE C.

TESIS

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

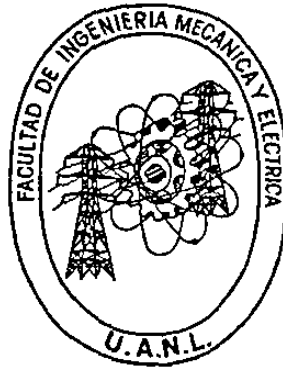
QUE PRESENTA

FRANCISCO LAZARO DE LUNA SANMIGUEL

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE DE 1996

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



PROPUESTA DE MATERIAL DE ESTUDIO PARA LAS MATERIAS DE  
TEORIA DE CONTROL I Y II, QUE SE IMPARTEN EN LA EIME DE LA UA DE C.

TESIS

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

QUE PRESENTA

FRANCISCO LAZARO DE LUNA SANMIGUEL

MONTERREY N.L.

DICIEMBRE DE 1996

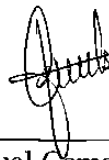


FONDO TESIS

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

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **“Propuesta de material de estudio para las materias de teoría de control I y II, que se imparten en la EIME de U.A. de C.”**, realizada por el **Ing. Francisco Lázaro de Luna Sanmiguel** 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. César Elizondo González  
Coasesor



---

M.C. Félix González Estrada  
Coasesor



---

Vó.Bo.  
M.C. Roberto Villarreal Garza  
División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N.L. a 16 de Diciembre de 1996

## DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

Primeramente debo agradecer a Dios por haberme prestado vida y salud para realizar este esfuerzo.

Dedico este trabajo a mi madre ausente que supo inculcár en mí, los más altos valores que me han servido de inspiración y guía, y a mi padre que con su trabajo diario ha sido un ejemplo.

Dedico también esta obra a mi esposa, que ha sido la compañera de mi vida , a mis hijos que me han dado su estímulo para seguir adelante y a los cuales les he quitado todas estas horas dedicadas a la elaboración de mi Tesis.

A mis maestros les guardo respeto y agradecimiento por su paciencia, su sabiduría, su dedicación y porque sin su apoyo no me hubiera sido posible llegar hasta aquí.



## PROLOGO

La Escuela de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de Monclova, dependiente de la Universidad Autónoma de Coahuila, ahora en proceso para convertirse en Facultad, ha sido pionera y cuna de varias escuelas de Educación Superior en Monclova.

Fundada en 1957, con la carrera de Ingeniero Mecánico Electricista, posteriormente se han ido creando otras carreras, algunas de las cuales ya trabajan como escuelas independientes de la Universidad de Coahuila en Monclova.

Actualmente se ofrecen en la EIME, además de la carrera de IME, las carreras de Ingeniero Electrónico Industrial (IEI) y de Ingeniero en Sistemas Computacionales (ISC).

Como es lógico, a lo largo de todos estos años los programas de estudio periódicamente se han ido modificando, adecuándolos a la realidad actual. Los Planes de Estudio actualmente incluyen dentro de sus materias tres cursos de Teoría de Control que se imparten en las carreras de IME e IEI.

El material de estudio que se presenta en esta Tesis ha sido preparado para utilizarse como libro de apoyo para los estudiantes que no tienen antecedentes y que por primera vez estudiarán lo que es la Teoría de Control, aunque también se puede utilizar como una referencia para estudiantes avanzados o ingenieros que ya se desempeñan en el desarrollo de su profesión.

Es mi mayor deseo que realmente este material sea de mucha utilidad para todos los estudiantes, pues trato de explicarme al máximo para su mejor aprovechamiento. Sin embargo considerando la posibilidad de errores en los que pueda incurrir involuntariamente, acepto la crítica constructiva como la mejor forma de superar este trabajo.

## JUSTIFICACION

Despues de varios años de impartir una materia, realmente se aprende sobre el tema y se profundiza con mayor detalle. Aunque la cátedra impartida aparentemente es la misma año con año, si al maestro le gusta y le apasiona su trabajo, cada vez más va enriqueciendo su cátedra con opiniones de otros autores, con experiencias personales y con nuevos y mejores ejemplos de aplicación práctica en la vida real.

Esto es lo que en mi opinión hace la gran diferencia entre una clase amena e interesante y otra tediosa y sin motivación, y es también la diferencia entre un maestro sin experiencia y otro que ha vivido y conoce realmente las materias que imparte.

Generalmente ésta experiencia de muchos años en la práctica docente no se aprovecha plenamente y el maestro casi nunca deja nada escrito cuando abandona la cátedra universitaria, perdiéndose así todo ése gran potencial por completo.

Considero que como maestros universitarios tenemos una gran responsabilidad y la obligación de aportar más a nuestra clase de lo que nuestros alumnos pueden obtener de un libro de texto, pues si sólo nos concretamos a repetir lo que ya viene en un libro, facilmente podremos ser substituidos por éste. En pocas palabras debemos de apoyar, orientar, enriquecer y dar lo mejor de nosotros mismos para que nuestros alumnos logren alcanzar la excelencia en sus objetivos de aprendizaje, éste es el verdadero reto de un maestro.

Este trabajo de escribir mis apuntes recopilados durante varios años, es una modesta aportación personal que deseo realizar para regresar aunque sea un poco de lo mucho que yo he recibido de la Escuela de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, especialmente de mis alumnos y mis compañeros maestros.

Creo que si se logran aunque sea en parte mis deseos, ésto justifica más que plenamente las horas de trabajo que significó para mí la realización de ésta Tesis.

## OBJETIVO

La elaboración de cualquier Tesis, ya sea a nivel de Licenciatura, Maestría o Doctorado, es un trabajo muy arduo, que consume muchas horas de estudio y preparación durante meses.

Cuando la Tesis desarrollada trata sobre un tema muy especializado o sobre alguna investigación o proceso poco conocido, generalmente ésta Tesis termina archivada en algún anaquel de biblioteca, sin ninguna aplicación real a tanto esfuerzo desarrollado en vano.

El principal objetivo de desarrollar ésta Tesis, es que no se pierda como uno más de los volúmenes en la biblioteca de la escuela, sino que los alumnos la aprovechen como un verdadero apoyo académico que les ayude a aclarar sus dudas sobre la materia.

Este trabajo es un resumen de varios años de práctica docente para poder ofrecer al alumno un material adecuado y así lograr una cátedra amena e interesante, que sea útil para una introducción efectiva al diseño de los Sistemas de Control.

Siempre había sido un anhelo personal el poder escribir un resumen bien organizado del material de estudio de las materias que he impartido durante varios años en la EIME, pero por una u otra razón no se había concretado éste proyecto.

Ahora que inicio éste trabajo de escribir mis notas recopiladas através de varios años de práctica docente, considero que se lograrán simultáneamente varios objetivos, todos muy importantes. Por un lado la creación de un material de estudio propio, lo cual le dará una mayor presencia y nivel académico a nuestra institución. Por otro lado los alumnos tendrán a la mano la posibilidad de obtener en un solo volumen todo el material que tendrían que consultar en varios libros, con el consiguiente ahorro en costo y finalmente la obtención de mi grado de Maestro en Ciencias, lo cual culminará una etapa más de mi vida, de varios años de estudio y trabajos realizados.

## SINTESIS

Cuando uno estudia un tema como la Teoría del Control o cualquier otra materia, generalmente se piensa que al existir muchos libros que hablan sobre el tema, cualquier persona con los antecedentes necesarios, debe entender lo que el autor del libro expresa en su obra. La realidad sin embargo es, que no siempre el autor logra explicarse de tal forma que los estudiantes entiendan perfectamente.

El hecho de que no se cumpla el objetivo del aprendizaje se puede deber a varias razones, por ejemplo a una explicación confusa, explicación incompleta, falta de comunicación directa con el autor y en el caso de traducciones, que se presenta muy a menudo, errores en la traducción o falta de conocimiento de la realidad que se vive en un país completamente diferente al del autor.

Por todo lo anterior, la presente Tesis, en síntesis es un intento por adecuar los principios fundamentales de la Teoría del Control a la realidad diaria que vivimos con nuestros estudiantes y esto solo se puede hacer cuando se conoce el entorno de la sociedad en la que nos desenvolvemos. Esta es la razón por la cuál a pesar del desarrollo de los más modernos métodos de enseñanza-aprendizaje, el maestro de calidad ha sido, es y será un personaje insustituible e indispensable en todas las instituciones de enseñanza de cualquier nivel.

## INDICE GENERAL

### I.- PAGINAS PRELIMINARES.

- I.1.- Contraportada (UANL)
- I.2.- Contraportada (FIME)
- I.3.- Carta del Comité de Tesis
- I.4.- Dedicatorias y Agradecimientos
- I.5.- Prologo
- I.6.- Justificación
- I.7.- Objetivo de la Tesis
- I.8.- Sintesis
- I.9.- Indice General

### II.- CAPITULOS.

	Pag.
II.1.- Introducción a los Sistemas de Control	
1-1.- Introducción.....	1
1-2.- Breve reseña historica del desarrollo de la Teoría del Control.....	2
1-3.- Terminología Especial para Sistemas de Control.....	3
1-4.- Sistemas de Control de Lazo Abierto y de Lazo Cerrado.....	5
1-5.- Ejemplos de Sistemas de Control.....	12
1-6.- Requerimientos Generales de un Sistema de Control..	18
II.2.- La Transformada de Laplace	
2-1.- Introducción y breve repaso de numeros, variables y funciones complejas.....	19
2-2.- La Transformada de Laplace.....	25
2-3.- La Transformada Inversa de Laplace.....	43
II.3.- Modelos Matematicos y Funciones de Transferencia	
3-1.- Modelos Matematicos.....	55
3-2.- Funciones de Transferencia.....	58
3-3.- Linealización de Modelos Matematicos no Lineales...	67
II.4.- Diagramas de Bloques y Graficos de Flujo de Señal	
4-1.- Diagramas de Bloques.....	72
4-2.- Cálculo de Funciones de Transferencia de Sistemas Fisicos.....	89
4-3.- Gráficos de Flujo de Señal.....	101
II.5.- Acciones Básicas de Control	
5-1.- Introducción.....	114
5-2.- Clasificación de los Sistemas de Control Automatico	114
5-3.- Controles Electronicos Tipo P, P-D, P-I, y P-I-D...	123
II.6.- Respuesta Transitoria	
6-1.- Introducción.....	134
6-2.- Especificaciones en el Dominio del Tiempo.....	135
6-3.- Sistemas de Primer Orden.....	136



6-4.-	Sistemas de Segundo Orden.....	142
6-5.-	Respuesta a la señal escalón unitario de un sistema de segundo orden.....	146
6-6.-	Especificaciones de la Respuesta Transitoria.....	153
6-7.-	Análisis de la estabilidad en el Plano Complejo....	155
6-8.-	Criterio de Estabilidad de Routh.....	156
6-9.-	Análisis de la Estabilidad Relativa.....	160
6-10.-	Determinación del Rango de Ganancia K de un Sistema de Control, aplicando el Criterio de Routh.	161
II.7.- Análisis del Error		
7-1.-	Concepto del Error.....	164
7-2.-	El Error Estacionario.....	164
7-3.-	Clasificación de los Sistemas de Control.....	166
7-4.-	Coefficientes de Error Estático.....	166
II.8.- Método del Lugar de las Raíces		
8-1.-	Introducción.....	173
8-2.-	El Concepto del Lugar de las Raíces.....	173
8-3.-	Graficas para funciones de transferencia simples...	174
8-4.-	Reglas para graficar rapidamente.....	180
8-5.-	Ejemplos Ilustrativos.....	189
8-6.-	Aplicaciones de la Grafica del Lugar de las Raíces.	196
8-7.-	Como establecer la Ganancia K de un Sistema de Control.....	199
8-8.-	Cálculo de la Respuesta Transitoria de un Sistema..	201
8-9.-	Conclusiones.....	204
II.9.- Métodos de Respuesta a la Frecuencia		
9-1.-	Introducción.....	206
9-2.-	Justificación de la substitución de s por $j\omega$ .....	207
9-3.-	Graficas en Coordenadas Polares.....	209
9-4.-	Graficas en Coordenadas Rectangulares.....	212
9-5.-	El punto de vista grafico.....	214
9-6.-	Determinación experimental de la Respuesta a la Frecuencia.....	215
9-7.-	Diagramas de Bode.....	217
9-8.-	Márgen de Ganancia y Márgen de Fase.....	237
9-9.-	Criterio de Nyquist.....	244
9-10.-	Graficas del Módulo en función del Angulo Lugar de Black.....	267
9-11.-	Lugares de Amplitud Constante "M" y Fase Constante "N" en el Plano Complejo.....	268
9-12.-	Cartas de Nichols.....	276
II.10.- Conclusiones y Recomendaciones.....		
II.11.- Bibliografía.....		
		288

II.12.- Apéndices	
12-1.- Apéndice A. Tablas de la Transformada de Laplace...	289
12-2.- Apéndice B. Solución de Ecuaciones.....	293
12-3.- Apéndice C. Carta de Nichols.....	296
12-4.- Apéndice D. Tabla para la conversión de decibeles..	297
12-5.- Apéndice E. Tabla de $1 + j\omega\tau$ .....	298
12-6.- Apéndice F. Respuestas a los problemas propuestos..	299