

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



**ANALISIS DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS
LINEALES INVARIANTES EN EL TIEMPO**

**POR
ING. PEDRO FRANCISCO ALOR SANDOVAL**

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

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.
DICIEMBRE DEL 2000**

TM
TJ213
.A66
2000
c.1



1080094218

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



ANALISIS DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS
LINEALES INVARIANTES EN EL TIEMPO

POR
ING. PEDRO FRANCISCO ALOR SANDOVAL

TESIS

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

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.
DICIEMBRE DEL 2000

TM

TJ213

.AGG

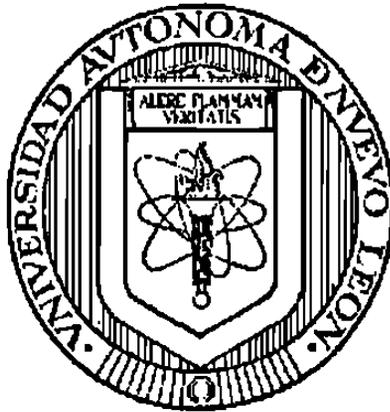
2000



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANALISIS DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS LINEALES
INVARIANTES EN EL TIEMPO**

POR

ING. PEDRO FRANCISCO ALOR SANDOVAL

TESIS

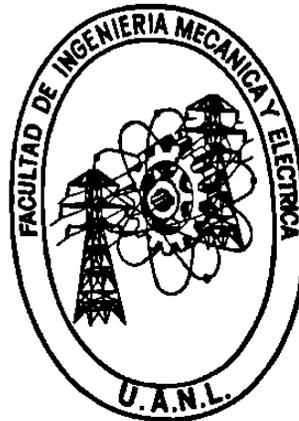
**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN
CONTROL**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.,
DICIEMBRE DEL 2000**

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANALISIS DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS LINEALES
INVARIANTES EN EL TIEMPO**

POR

ING. PEDRO FRANCISCO ALOR SANDOVAL

TESIS

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

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.,
DICIEMBRE DEL 2000**

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

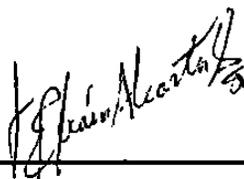
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Análisis de Estabilidad de Sistemas lineales Invariantes en el Tiempo" realizada por el Ing. Pedro Francisco Alor Sandoval, matrícula 1036837, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Control.

El comité de Tesis



Asesor

Dr. César Elizondo González



Coasesor

Dr. Efrain Alcorta García



Coasesor

Dr. Juan Antonio Rojas Estrada



Vo.Bo.

M.C. Roberto Villarreal Garza

División de Estudios de Post-Grado

San Nicolás de los Garza, N.L., Diciembre del 2000

Dedicada a :

A mis padres, Pedro Alor Ramos y Norma Sandoval Morán por darme todo su apoyo, confianza y cariño incondicional y que han sido y seguirán siendo un ejemplo a seguir; a mis hermanas Norma Beatriz Alor Sandoval y Rocio Araceli Alor Sandoval por ser siempre como son, por mantenernos siempre unidos a pesar de las distancias. Por darme esa Seguridad de saber que cuento con toda mi familia en cualquier momento.

A mi novia Rebeca Fleming por compartir esos momentos con tanto cariño.

A mis amigos: M.C. Guillermo Álvarez Pérez, M.C. Jesús Cruz Álvarez, Ing. Oscar Vázquez Roquet, Lic. Azalea Martínez Libas y Carlos Aragón Navarro que en paz descanse; a todos ellos por su apoyo y amistad.

Agradecimientos:

A mi asesor, el Dr. César Elizondo González , por toda su ayuda y colaboración para la conclusión de esta tesis, al igual que a mis coasesores el Dr. Efrain Alcorta García y el Dr. Juan Antonio Rojas Estrada.

A todos mis compañeros de maestría por su grata compañía y amistad, en especial a los Alfredos (tocayos) y a Claudia Alina madrigal.

PROLOGO

El control automático es uno de los mayores movimientos en la tecnología, ha sido llamado la segunda revolución industrial y habrá cada vez más y más control automático en nuestras vidas. Por lo que ha sido últimamente una materia de gran importancia o especialidad. En la actualidad podemos controlar procesos con varias variables de entrada y salida, lo que corresponde al control moderno.

Uno de los principales elementos de un control automático es la retroalimentación, ya que sin ella no podríamos comparar el comportamiento de nuestra planta con el modelo establecido. La estabilidad, el funcionamiento y la robustez, son unos de los requisitos primarios para un sistema de control con retroalimentación.

El crecimiento de la automatización en nuestros días ha sido significativo, aunque existen métodos modernos (Teoría de control moderna) para el análisis y diseño de control automático, los métodos clásicos (Teoría de control clásica) siguen siendo de gran utilidad, de hecho, varios de los nuevos métodos se basan en criterios de teoría clásica que es la mayor parte de este trabajo.

El propósito de esta tesis es presentar de una manera analítica las diferentes técnicas que nos sirven para determinar la estabilidad tanto absoluta como relativa de sistemas lineales invariantes en el tiempo, aunque existen varios paquetes computacionales capaces de simplificar muchas de estas técnicas, que son de gran ayuda, ya que muchas de estas técnicas son métodos gráficos que pueden consumir mucho tiempo elaborarlos, por lo que me he enfocado también al uso de algunos paquetes computacionales para la realización de estos métodos.

Dentro de los métodos que se utilizarán para el análisis de estabilidad se encuentra el proceso de Nyquist en 1932, para determinar la estabilidad de lazo cerrado sobre la base de la respuesta a lazo abierto con excitación sinusoidal en régimen permanente, diagramas de Bode, carta de Nichols y Mikhilov todos estos dentro del dominio de la frecuencia, y en el dominio del espacio de los coeficientes tenemos el

criterio de Routh Hurwitz, Tabla equivalente de Routh y el método del lugar geométrico de las raíces.

INDICE

SINTESIS	1
1 INTRODUCCION	4
1.1 Planteamiento del problema	4
1.2 Objetivo de la tesis	4
1.3 Justificación de la tesis	5
1.4 Metodología	5
1.5 Límites de estudio	6
1.6 Revisión bibliográfica	6
2 REPRESENTACION DE SISTEMAS LINEALES	
INVARIANTES EN EL TIEMPO	7
2.1 Introducción	7
2.2 Representación en entrada-salida	8
2.2.1 Función de transferencia	9
2.3 Representación en variables de estado	10
2.3.1 Matriz función de transferencia	13
2.3.2 Solución de las ecuaciones de estado	15
2.3.3 Matriz de transición	19
2.4 Estabilidad	20
3 ANALISIS DE ESTABILIDAD EN EL DOMINIO DE LA	
FRECUENCIA	24
3.1 Introducción	24
3.2 Respuesta a la frecuencia	26
3.3 Criterio de estabilidad de Nyquist	28

3.3.1	Estabilidad relativa	38
3.4	Diagramas de Bode	43
3.4.1	Criterio de estabilidad	53
3.5	Carta de Nichols	53
3.6	Criterio de estabilidad de Mikhailov	60
4	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN EL ESPACIO DE LOS COEFICIENTES	62
4.1	Introducción	62
4.2	Criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz	63
4.2.1	Criterio de Hurwitz	63
4.2.2	Criterio de Routh	64
4.3	Método del lugar geométrico de las raíces	71
4.3.1	Reglas para construir el lugar de las raíces	74
4.4	Tabla equivalente de Routh	79
5	APLICACIONES	
5.1	Introducción	81
5.2	desarrollo del modelo matemático	83
5.2.1	Linealización	84
5.2.2	Función de transferencia	86
5.3	determinación de los coeficientes de la función de transferencia	89
5.3.1	Determinación de C_v	89
5.4	Estabilidad	93
6	CONCLUSIONES	96
	BIBLIOGRAFIA	98
	LISTADO DE TABLAS	100
	LISTADO DE FIGURAS	101
	GLOSARIO	103

APENDICE A	105
APENDICE B	111
AUTOBIOGRAFIA	117