

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



TÉCNICAS DE CONTROL BASADAS EN EL
DOMINIO FISICO PARA SISTEMAS LTI MIMO.
APLICACION A LA MAQUINA SINCRONA

TESIS
EN OPCION AL GRADO DE DOCTOR EN
INGENIERIA ELECTRICA

PRESENTA
GILBERTO GONZALEZ AVALOS

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

JUNIO DE 2004

EL
BASADO EN EL
CONTROL DE
TECNICAS DE
COMUNICACION
FISICO PARA
SISTEMAS
TIEMPO.
DOMINIO
SINCRONA
A UNA
MAGNITUD
SINCRONA
APLICACION
A UNA
MAGNITUD
SINCRONA

TD
Z5853
.M2
FIME
2004
.G66

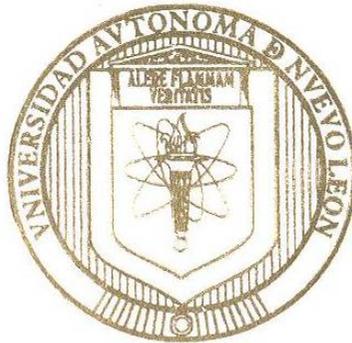
2004

666



1020131315

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



TECNICAS DE CONTROL BASADAS EN EL
DOMINIO FISICO PARA SISTEMAS LTI MIMO.
APLICACION A LA MAQUINA SINCRONA

TESIS
EN OPCION AL GRADO DE DOCTOR EN
INGENIERIA ELECTRICA

PRESENTA
GILBERTO GONZALEZ AVALOS

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

JUNIO DE 2004

... 93

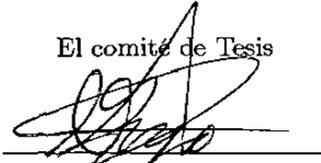
TD
25
.M2
F
200d
566



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

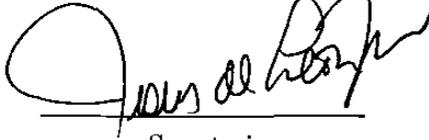
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “**Técnicas de Control Basadas en el Dominio Físico para Sistemas LTI MIMO. Aplicación a la Máquina Síncrona**” realizada por Gilberto González Avalos sea aceptada para su defensa como opción al Grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica.

El comité de Tesis



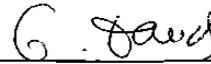
Asesor

Dr. René Galindo Orozco



Secretario

Dr. Jesús de León Morales



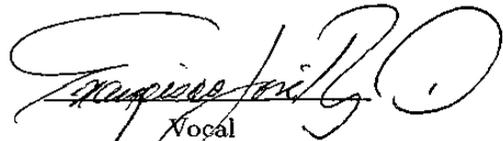
Vocal

Dr. Geneviève Dauphin-Tanguy



Vocal

Dr. Efraín Alcorta García



Vocal

Dr. Francisco J Ruiz Sánchez



Vo. Bo.

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
División de Estudios de Postgrado

Resumen

Técnicas de Control Basadas en el Dominio Físico para Sistemas LTI MIMO. Aplicación a la Máquina Síncrona.

Publicación No.

Gilberto González Avalos

Universidad Autónoma de Nuevo León

Asesor: René Galindo Orozco

En este trabajo de tesis se presentan técnicas, procedimientos y estructuras para control basadas en el dominio físico para el análisis de sistemas LTI MIMO. Estas técnicas se aplican a sistemas modelados en Bond Graph.

Se presentan procedimientos para la obtención de las matrices A_p , B_p , C_p , D_p a partir del sistema modelado en el dominio físico. Esta realización de un sistema modelado en Bond Graph se obtiene a partir de un grafo de Coates modificado, que se propone.

La estabilidad de un sistema modelado en Bond Graph es determinada a partir de la obtención gráfica del polinomio característico del sistema. Se propone un grafo de estabilidad de Coates a partir del cual, se encuentran las condiciones de estabilidad del sistema.

Se presenta una estructura y procedimientos para realizar un control por retroalimentación de estado estimado de un sistema modelado en Bond Graph, y se propone la determinación del modelo matemático del sistema y del observador en lazo cerrado. Además, se asignan las ganancias al control y al observador.

El estado estacionario de un sistema modelado en Bond Graph se determina directamente en el dominio físico utilizando el modelo en causalidad derivativa del sistema evitando la obtención de la matriz inversa de A_p del sistema. Así mismo, se presenta una estructura que permite la obtención del error del sistema retroalimentando la salida y aplicando un control proporcional en el dominio físico.

Una clase de sistemas no lineales modelados en Bond Graph son linealizados en el dominio físico con la aplicación de la estructura que se presenta.

Finalmente, se estudia y modifica un modelo de una máquina síncrona dada por Dietrich para la obtención del modelo matemático de Anderson. Se proponen modelos reducidos en Bond Graph y la determinación de las constantes de tiempo. Las técnicas presentadas en el dominio físico son aplicadas al modelo en Bond Graph de la máquina síncrona.

Índice General

Índice de Figuras	ix
Índice de Tablas	xiv
1 Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Motivación y Contribución de esta Tesis	2
1.2.1 Motivación para Desarrollar esta Tesis.	2
1.2.2 Contribuciones de esta Tesis	2
1.3 Objetivo de la Tesis	4
1.3.1 Metas	4
1.4 Organización de la Tesis	4
1.5 Planteamiento del Problema	5
2 Antecedentes	7
2.1 Introducción	7
2.2 Modelado [18, 19, 31]	7
2.3 ¿Qué es un Bond Graph?	8
2.4 Componentes Básicos de un Bond Graph [18, 31, 55]	9
2.4.1 Puertos-1 Pasivos	10
2.4.2 Puertos-1 Activos o Fuentes	11
2.4.3 Los Elementos Ideales de Puerto-2	12
2.4.4 Los Elementos de Unión, Puertos-3	12
2.4.5 Causalidad para los Multipuertos Básicos	13
2.4.6 La Causalidad Derivativa en un Bond Graph.	16

2.4.7	Bond Activo	17
2.5	Procedimiento para el Modelado de Sistemas [58]	18
2.5.1	Sistemas Eléctricos	19
2.5.2	Sistemas Mecánicos	20
2.5.3	Sistemas Hidráulicos.	22
2.6	Estructuras de Unión en Sistemas Multipuerto [5, 31]	23
2.6.1	Vectores Clave o Vectores Significativos	23
2.6.2	Relaciones de Campo y Ecuación de Estado.	24
2.7	Conclusiones	26
3	Obtención de la Realización LTI MIMO Utilizando un Grafo Lineal a partir de su Bond Graph	27
3.1	Introducción	27
3.2	Antecedentes [69]	28
3.2.1	Conceptos Básicos de Grafos Abstractos	28
3.2.2	Operaciones en Grafos	30
3.2.3	Grafos Dirigidos	31
3.2.4	Propiedades de los Grafos Dirigidos	32
3.3	Obtención de un Grafo Lineal a partir de su Bond Graph	32
3.4	Representación de un Sistema LTI MIMO	36
3.5	Obtención gráfica de las Matrices A_p , B_p , C_p y D_p	37
3.5.1	Obtención de la Matriz A_p a partir de un grafo	37
3.5.2	Obtención de la Matriz B_p a partir de un grafo	39
3.5.3	Obtención de la Matriz C_p a partir de un grafo	41
3.5.4	Obtención de la Matriz D_p a partir de un grafo	42
3.6	Ejemplos	43
3.6.1	Ejemplo de un Sistema Mecánico	43
3.6.2	Ejemplo de un Sistema Eléctrico	47
3.7	Conclusiones	51
4	Condiciones de Estabilidad en el Sentido de Hurwitz para un Sistema LTI MIMO Utilizando Grafos Lineales a partir de su Bond Graph	52
4.1	Introducción	52

4.2	Antecedentes de estabilidad en sistemas lineales	53
4.2.1	Criterio de Hurwitz [4, 12, 26]	53
4.3	Obtención del Polinomio Característico	55
4.3.1	Gráfica de Coates [69]	55
4.4	Obtención de las Condiciones de Estabilidad	56
4.5	Ejemplos	58
4.5.1	Sistema Mecánico en Lazo Abierto	58
4.5.2	Sistema Mecánico en Lazo Cerrado	62
4.6	Conclusiones	65
5	Control Directo en Bond Graph por Retroalimentación de Estado Estimado para Sistemas LTI MIMO	66
5.1	Introducción	66
5.2	Antecedentes de la ley de control	67
5.2.1	Observador Asintótico de Luenberger [12, 14, 47, 68]	67
5.2.2	Control por retroalimentación de estado estimado [51]	69
5.3	Control Directo en Bond Graph	71
5.4	Ejemplos	78
5.4.1	Sistema Electromecánico	78
5.4.2	Sistema Hidráulico	83
5.5	Conclusiones	89
6	Valores de Estado Estacionario para un Sistema Físico LTI MIMO utilizando Bond Graph	90
6.1	Introducción	90
6.2	Antecedentes de estado estacionario	91
6.2.1	Estado Estacionario	92
6.2.2	Sistema en Lazo Cerrado	93
6.3	Estado Estacionario de las Variables de Estado y de la Salida del Sistema en Bond Graph	93
6.3.1	Ejemplo de un Sistema Mecánico	95
6.3.2	Ejemplo de un Sistema Eléctrico	97
6.4	Error en Estado Estacionario del Sistema Retroalimentado con un Control Proporcional en Bond Graph	100

6.4.1	Ejemplo de un Motor de CD	103
6.5	Conclusiones	105
7	Linealización por Bond Graph	106
7.1	Introducción	106
7.2	Antecedentes [70]	107
7.2.1	Linealización Algebraica [70]	107
7.3	Linealización por Bond Graph	109
7.4	Procedimiento para obtener un Bond Graph linealizado	111
7.5	Ejemplo de un Cuerpo Rígido	112
7.6	Conclusiones	115
8	Modelado de la Máquina Síncrona en Bond Graph	116
8.1	Introducción	116
8.2	Descripción Matemática de la Máquina Síncrona [52, 53]	117
8.2.1	Ejes Directo y en Cuadratura	118
8.2.2	Representación Esquemática de los Circuitos de una Máquina Síncrona	118
8.2.3	Transformación de Park [52]	119
8.2.4	Ecuaciones de Enlace de Flujo [53]	120
8.2.5	Ecuaciones de Voltaje	123
8.2.6	Formulación de Ecuaciones en Espacio de Estado	124
8.2.7	Formulación de Corriente	124
8.2.8	La Ecuación de Onda Normalizada	125
8.3	El Modelo de Bond Graph de la Dinámica de la Máquina Síncrona	127
8.4	Modelos Simplificados de la Máquina Síncrona utilizando Bond Graph	130
8.4.1	Sin devanados de amortiguamiento.	130
8.4.2	A Velocidad Constante	132
8.5	Obtención de las Constantes de Tiempo en Bond Graph	133
8.6	Conclusiones	138
9	Aplicación de Herramientas Gráficas al Análisis de la Máquina Síncrona	139
9.1	Introducción	139
9.2	Obtención Directa de una Representación en Espacio de Estado	140

9.3	Obtención de las Condiciones de Estabilidad Utilizando una Gráfica Lineal	144
9.4	Obtención del Estado Estacionario de la Máquina Síncrona utilizando Bond Graph	148
9.5	Control de una Máquina Síncrona por Retroalimentación de Estados Estimados .	149
9.6	Modelo Lineal de la Máquina Síncrona utilizando Bond Graph	152
9.7	Conclusiones	155
10	Conclusiones y Trabajos Futuros	156
10.1	Conclusiones	156
10.2	Trabajos Futuros	157
	Bibliografía	159
A	Análisis de las Propiedades Estructurales del Modelado en Bond Graph	165
A.1	Introducción [29]	165
A.2	Presentación de Herramientas Algebraicas y Gráficas [29]	166
A.2.1	Definición de la Estructura de Σ	166
A.2.2	Controlabilidad/Observabilidad Estructural	166
A.3	Rango Estructural [29]	167
A.4	Diseño de la Arquitectura para Medición y Control [29]	168
A.5	Trayectoria Causal-Lazo Causal [31, 32]	169
B	Estabilidad de Sistemas LTI MIMO	170
B.1	Introducción	170
B.2	Estabilidad Externa (Estabilidad BIBO) [12]	170
B.3	Estabilidad en el Sentido de Lyapunov o Estabilidad Interna o Criterio de Estabilidad de Lyapunov [68]	171
C	Publicaciones	173
C.1	A Direct Graph Procedure from Bond Graph for MIMO LTI Systems	173
C.2	<i>Hurwitz Stability Conditions For a LTI System: A Bond Graph Approach</i>	179
C.3	Direct Control in Bond Graph by State Estimated Feedback for MIMO LTI Systems	185
C.4	Steady-State Values for a Physical System with Bond Graph Approach	191
C.5	Linearization in Bond Graph	197
C.6	Steady-State for a Physical System with Bond Graph Approach	203

Índice de Figuras

Figura 1.1 Diagrama a bloques de la estructura de la tesis.	3
Figura 2.1 Bond con sus variables de potencia.	9
Figura 2.2 Tetrahedro de estado.	11
Figura 2.3 Puertos-1, activos.	11
Figura 2.4 Bond Graph de un transformador y de un girador.	12
Figura 2.5 Unión-0.	12
Figura 2.6 Unión-1.	13
Figura 2.7 Causalidad para un bond	13
Figura 2.8 Ejemplo de unión-0 sin causalidad.	14
Figura 2.9 Ejemplo de unión-0 con causalidad.	14
Figura 2.10 Elemento- C en causalidad integral.	15
Figura 2.11 Elemento- C en causalidad derivativa.	15
Figura 2.12 Ejemplo de un circuito eléctrico en causalidad derivativa.	16
Figura 2.13 Bond Graph en causalidad derivativa de la figura 2.12.	17
Figura 2.14 Bond activo.	17
Figura 2.15 Bond Graph con un bond activo.	17
Figura 2.16 Ejemplo de un circuito eléctrico.	19
Figura 2.17 Procedimiento para obtener el Bond Graph de un circuito eléctrico.	19
Figura 2.18 Bond Graph del ejemplo de un sistema eléctrico.	20
Figura 2.19 Ejemplo de un Sistema mecánico.	21
Figura 2.20 Procedimiento para encontrar el Bond Graph de un sistema mecánico.	21
Figura 2.21 Bond Graph de un sistema mecánico.	21
Figura 2.22 Ejemplo de un sistema hidráulico.	22

Figura 2.23 Procedimiento para encontrar el Bond Graph de un sistema hidráulico. . .	22
Figura 2.24 Bond Graph del sistema hidralico.	23
Figura 2.25 Digrama de bloques de la Estructura de Unión de un Bond Graph.	23
Figura 3.1 Grafo del sistema planar.	33
Figura 3.2 Grafo de Coates modificado.	34
Figura 3.3 Representación de un sistema multivariable.	36
Figura 3.4 Sistema multivariable de dos nodos.	36
Figura 3.5 Sistema mecánico y su modelo en Bond Graph.	43
Figura 3.6 Grafo de Coates del sistema mecánico.	44
Figura 3.7 Sistema Eléctrico y su modelo en Bond Graph.	47
Figura 3.8 Grafo de Coates de un sistema eléctrico.	47
Figura 3.9 Grafo de Coates modificado del sistema eléctrico.	48
Figura 4.1 Subgrafo seccional de la matriz de Coates A_{pc}	55
Figura 4.2 Lazo propio de un nodo.	56
Figura 4.3 Ramas a la derecha.	56
Figura 4.4 Ramas a la izquierda.	57
Figura 4.5 Grafo seccional de un nodo.	58
Figura 4.6 Subgrafo seccional de dos nodos.	59
Figura 4.7 Subgrafo seccional de tres nodos.	59
Figura 4.8 Subgrafo seccional de cuatro nodos.	59
Figura 4.9 Grafo de Coates de estabilidad.	59
Figura 4.10 Subgrafo seccional de cuatro nodos.	60
Figura 4.11 Subgrafo seccional de tres nodos.	60
Figura 4.12 Subgrafo seccional de dos nodos.	61
Figura 4.13 Subgrafo seccional de un nodos.	61
Figura 4.14 Grafo lineal del sistema en lazo cerrado.	62
Figura 4.15 Grafo lineal reducido del sistema de lazo cerrado.	62
Figura 4.16 Subgrafo seccional de dos nodos.	63
Figura 4.17 Sugrafo seccional de tres nodos.	63
Figura 4.18 Subgrafo seccional de dos nodos.	63

Figura 5.1 Observador de estado en lazo abierto.	67
Figura 5.2 Observador asintótico de estado.	68
Figura 5.3 Retroalimentación de estado estimado.	70
Figura 5.4 Lazo cerrado con observador en diagrama de bloques.	71
Figura 5.5 Conexión de la entrada al sistema y observador.	77
Figura 5.6 Esquemas de retroalimentación de estado estimado.	77
Figura 5.7 Esquema de un motor de CD y su Bond Graph.	78
Figura 5.8 Bond Graph en causalidad derivativa de un motor de CD.	79
Figura 5.9 Observador y retroalimentación de estados para el motor de CD.	80
Figura 5.10 Gráfica del comportamiento de los enlaces de flujo donde: A) Estado del sistema; B) Estado estimado.	82
Figura 5.11 Gráfica del comportamiento de la salida, donde A) Estado del sistema; B) Estado estimado.	82
Figura 5.12 Sistema hidráulico y su Bond Graph.	83
Figura 5.13 Bond Graph en causalidad derivativa de un motor de CD.	85
Figura 5.14 Observador y retroalimentación de estado para el sistema hidráulico.	85
Figura 5.15 Gráfica del comportamiento de la presión, donde: A) Estado del sistema; B) Estado estimado.	88
Figura 5.16 Gráfica del comportamiento de la salida, donde: A) Salida del sistema; B) Salida estimada.	88
Figura 6.1 Sistema en lazo cerrado.	93
Figura 6.2 Bond graph en causalidad derivativa de la figura 3.5.	95
Figura 6.3 Variables de estado: (A) $q_2(t)$; (B) $p_6(t)$	96
Figura 6.4 Variables de estado: (A) $q_9(t)$; (B) $p_{12}(t)$	96
Figura 6.5 Ejemplo de un sistema eléctrico.	97
Figura 6.6 Bond Graph en causalidad integral.	97
Figura 6.7 Bond Graph en causalidad derivativa.	98
Figura 6.8 Variables de estado: (A) $q_4(t)$; (B) $p_5(t)$	99
Figura 6.9 Variable de estado $p_{10}(t)$	99
Figura 6.10 Sistema en lazo cerrado con un control proporcional.	100
Figura 6.11 Procedimiento gráfico para la obtención del error en estado estacionario en un enfoque de Bond Graph.	102
Figura 6.12 Bond Graph en lazo cerrado en causalidad integral de un motor de CD.	103

Figura 6.13 Bond Graph en lazo cerrado modificado en causalidad derivativa de un motor de CD.	104
Figura 6.14 Bond Graph en lazo cerrado en combinación con diagramas a bloques.	104
Figura 7.1 Estructura general de un sistema linerizado.	109
Figure 7.2 Bond Graph de un cuerpo rígido.	112
Figura 7.3 Bond Graph linealizado de la variable de estado de I_x	113
Figura 7.4 Bond Graph linealizado de un cuerpo rígido.	113
Figura 8.1 Representación esquemática de una máquina síncrona.	117
Figura 8.2 Diagrama esquemático de una máquina síncrona.	118
Figura 8.3 Pares aplicados al rotor de una máquina síncrona	125
Figura 8.4 Bond Graph de la máquina síncrona.	128
Figure 8.5 Modelo de Bond Graph máquina síncrona despreciando devanados de amortiguamiento.	130
Figura 8.6 Bond Graph a velocidad constante de la máquina síncrona.	132
Figura 8.7 Bond Graph para la constante de tiempo subtransitoria de la máquina síncrona.	134
Figura 8.8 Bond Graph para la constante de tiempo transitorio en el eje d	135
Figure 8.9 Bond Graph de la constante de tiempo subtransitoria en el eje q	136
Figura 9.1 Modelo de la máquina síncrona a velocidad constante y sin devanados de amortiguamiento.	140
Figura 9.2 Grafo lineal de la máquina síncrona de la figura 9.1.	141
Figura 9.3 Gráfica lineal de la máquina síncrona para análisis de estabilidad.	144
Figura 9.4 Factores-1 para a_1	145
Figura 9.5 Factores-1 para a_2	145
Figura 9.6 Factores-1 para a_3	146
Figura 9.7 Gráfica de estabilidad de Coates.	146
Figura 9.8 Determinante de Hurwitz D_3	146
Figura 9.9 Determinante de Hurwitz D_2	147
Figura 9.10 Determinante de Hurwitz D_1	147
Figura 9.11 Bond Graph de la máquina síncrona en causalidad derivativa y a velocidad constante.	148
Figura 9.12 Observador de Estados de una máquina síncrona.	149

Figura 9.13 Bond Graph linealizado de la máquina síncrona. 153

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Variables generalizadas de sistemas eléctricos y de sistemas mecánicos traslacionales.	10
Tabla 2.2 Variables generalizadas de sistemas mecánicos rotacionales y de sistemas hidráulicos.	10
Tabla 2.3 Elemento- <i>R</i>	11
Tabla 2.4 Elemento- <i>C</i>	11
Tabla 2.5 Elemento- <i>I</i>	11
Tabla 2.6 Consideraciones causales para los multipuertos básicos.	14
Tabla 2.7 Formas Causales para puertos 1.	16
Tabla 4.1 Grafos de Estabilidad de Coates.	57

Notación

- $\text{diag} \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ denota una matriz diagonal $p \times p$ cuyos elementos son $a_i, i = 1, \dots, p$.
- $I_{n \times n}$ denota la matriz identidad $n \times n$.
- $0_{m \times n}$ denota una matriz de dimensión $m \times n$ cuyos elementos son todos cero.
- $\lambda_i(A)$ denota los eigenvalores de A .
- $A \triangleq B$ denota A que está definida por B .
- A^T denota la matriz transpuesta de A .
- A^{-1} denota la matriz inversa de A .

Acrónimos

- LTI, Linear Time Invariant, Lineal e Invariante en el Tiempo.
- MIMO, Multi-Input Multi-Output, Multi-Entrada Multi-Salida.
- BIBO, Bounded Input Bouded Output, Entrada Acotada Salida Acotada.
- pu , por unidad.