

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE CIENCIAS FISICO MATEMATICAS



TRATAMIENTO INTEGRAL DE FILTRADO Y CONTROL
OPTIMO DE PROCESOS NO LINEALES CON MULTIPLES
RETARDOS VARIANTES EN EL TIEMPO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERIA FISICA INDUSTRIAL

PRESENTA

MARIA ARACELIA ALCORTA GARCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. OCTUBRE DE 2003

2003
TD
Z6651
FCFM
2003
.A4

TRATAMIENTO INTEGRAL DE FILTRADO Y CONTROL
OPTIMO DE PROCESOS NO LINEALES CON MULTIPLES
RETIARDOS VARIANTES EN EL TIEMPO

M.A.A.G.

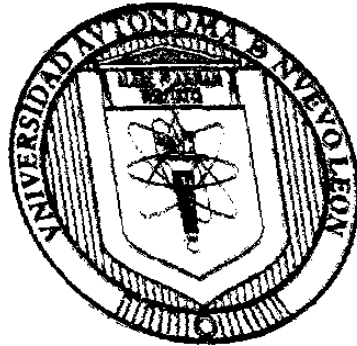


1020149244

m

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE CIENCIAS FISICO MATEMATICAS



TRATAMIENTO INTEGRAL DE FILTRADO Y CONTROL
OPTIMO DE PROCESOS NO LINEALES CON MULTIPLES
RETARDOS VARIANTES EN EL TIEMPO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERIA FISICA INDUSTRIAL

PRESENTA

MARIA ARACELIA ALCORTA GARCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. OCTUBRE DE 2003

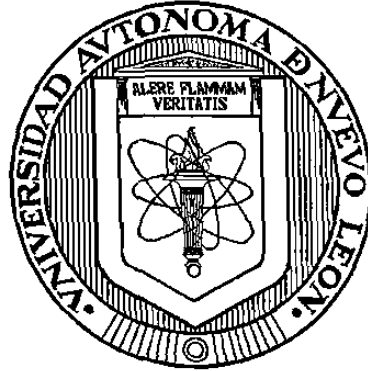
974861

TD
Z6651
FCFM
2003
.A4



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS



**TRATAMIENTO INTEGRAL DE FILTRADO Y CONTROL
ÓPTIMO DE PROCESOS NO LINEALES CON MÚLTIPLES
RETARDOS VARIANTES EN EL TIEMPO**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA FÍSICA INDUSTRIAL**

**PRESENTA
MARÍA ARACELIA ALCORTA GARCÍA**

San Nicolás de los Garza, N. L.

Octubre de 2003

Tratamiento Integral de Filtrado y Control de Procesos no Lineales con Múltiples Retardos en el Tiempo

Los miembros del comité aprueban la tesis
de doctorado de María Aracelia Alcorta García

Dr. Mikhail V. Basin
Asesor



Dr. Héctor Altuve Ferrer



Dr. César Elizondo González



Dr. Roger Z. Ríos Mercado



Dr. César Emilio Villarreal Rodríguez



Dedicada a:

La memoria de mi padre Mario René Alcorta Montemayor y a mi madre Aracelia García Hernández.

A mi esposo Francisco Javier Lozano Guerra y a mis hijos José Javier, Judit Aracelia, y Mariana Abigail.

Agradecimientos

Al Dr. Mikhail V. Basin, por su asesoría.

A los miembros del Comité de Tesis: Dr. Mikhail V. Basin, Dr. Héctor Altuve Ferrer, Dr. César Elizondo González, Dr. Roger Ríos Mercado, y Dr. César Emilio Villarreal Rodríguez por sus valiosas recomendaciones para mejorar la calidad de la tesis.

A los miembros del Comité doctoral del DIFI, por su apoyo durante todo el doctorado.

Al Dr. Alexander Pozniak, por su ayuda y comentarios como revisor externo.

A la MA Carmen del Rosario de la Fuente García, quién como directora de la FCFM me brindó su apoyo durante la segunda parte del doctorado.

Al Ing. Oscar Recio Cantú, quién como director de la FCFM me brindó su apoyo durante la primera parte del doctorado.

A mi familia, y en especial a mi madre Aracelia García Hdz., por su incondicional apoyo y ayuda, a mi esposo, Fco. Javier Lozano, por su ayuda y comprensión, y a mi hermano Efraín Alcorta García, por su valioso apoyo y orientaciones a lo largo del doctorado.

Al MC Alfredo Alanís Durán y a la MC Lilia López por su apoyo en la carga académica y orientaciones.

Al SNI por su asignación como candidato.

Al Promep por su apoyo para la escritura de la tesis.

A la UANL por su apoyo económico.

A mis compañeros maestros y amigos por hacerse partícipes de una o de otra forma de mis actividades en el doctorado.

Notación

A	Evento.
$P(A)$	Probabilidad del evento A .
Ω	Espacio muestral.
\emptyset	Evento imposible o conjunto vacío.
Σ	σ -álgebra.
A	Elementos de la σ -álgebra.
\cup	Unión de conjuntos.
\cap	Intersección de conjuntos.
\mathbf{B}	Álgebra de Borel.
X	Vector aleatorio.
x_i	Componentes del vector aleatorio X .
P_X	Distribución de la variable aleatoria X
\mathbb{R}^n	$\mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \dots \times \mathbb{R}$ (n veces).
$F(X)$	Función de distribución de X .
$f(x)$	Función de densidad de probabilidad de X .
$E(X), m_X$	Valor esperado de X o esperanza matemática.
$E(X Y)$	Esperanza condicional de X dada Y .
Γ_X	Momento de segundo orden.
K_X	Matriz de covarianza.
m_X^*	Transpuesta de la matriz m_X , tomando el conjugado de los elementos complejos.
λ	Vector de variables reales.
X^T	Trasposición del vector X .
ξ_p	Número complejo.
μ_X	Valor esperado de X .

Continuación de la Notación

$X_r \xrightarrow{m} X$	X_r converge en media cuadrática a X .
$\ X\ $	Norma del vector X .
$\nu(t)$	Intensidad del ruido blanco.
$\delta(t)$	Función delta de Dirac.
X_t^0	$X_t - m_t$.
$W(t)$	Proceso de Wiener.
$\omega(t)$	Realizaciones de $W(t)$.
$K_w(t_1, t_2)$	Covarianza del proceso de Wiener.
V	Ruido blanco.
u	Entrada de control.
u^*	Ley de control óptima.
$Y(t)$	Proceso de salida.
$W_1(t), W_2(t)$	Procesos de Wiener.

Resumen

Tratamiento Integral de Filtrado y Control de Procesos no Lineales
con Múltiples Retardos Variantes en el Tiempo

Publicación No. _____

María Aracelia Alcorta García

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Profesor asesor: Dr. Mikhail V. Basin

Octubre, 2003

En el trabajo desarrollado en la presente tesis fueron obtenidos los algoritmos de filtrado y control óptimos para sistemas de Itô-Volterra, sistemas polinomiales de tercer y cuarto grados, y sistemas bilineales, en todos los casos anteriores, con observaciones continuas en el tiempo, y además con observaciones discontinuas para el caso de los sistemas de Itô-Volterra. También se trabaja con el caso en el cual el proceso es no observable, tanto en los sistemas de Itô-Volterra, así como en los sistemas polinomiales, obteniendo los algoritmos del controlador, mediante la aplicación de los principios de dualidad y de separación. En el caso de los algoritmos de filtrado, control y controlador polinomial obtenidos, se realiza una aplicación a un sistema automotriz, en la cual se compara la eficacia de estos algoritmos con respecto a los algoritmos del filtro lineal de Kalman-Bucy. Por último, se obtienen los algoritmos de filtrado para sistemas bilineales, para los cuales se presenta una aplicación a un reactor de polimerización en la cual se compara la eficacia de los algoritmos de filtrado obtenidos, con los lineales (de Kalman-Bucy). Los algoritmos de filtrado presentados en este trabajo, son obtenidos matemáticamente y su eficacia es mostrada mediante simulación en *MatLab 6, versión 1.2*.

Índice general

1. Introducción	12
1.1. Introducción	12
1.2. Antecedentes	13
1.3. Motivación	16
1.4. Aportaciones	17
1.4.1. Control Óptimo en Sistemas de Itô-Volterra	17
1.4.2. Controlador Óptimo para Sistemas no Observables de Itô-Volterra	18
1.4.3. Filtrado Óptimo en Sistemas Polinomiales	18
1.4.4. Ecuaciones del Filtro para Ecuaciones de Estado Bilineales	19
1.4.5. Control Óptimo en Sistemas Polinomiales	19
1.4.6. Controlador Óptimo en Sistemas Polinomiales	19
1.5. Organización de la Tesis	20
2. Marco Teórico	22
2.1. Probabilidad y Estadística	22
2.1.1. Conceptos Básicos	22
2.1.2. Variables Aleatorias	25

2.1.3.	Convergencia de Variables Aleatorias	30
2.1.4.	Procesos Estocásticos	31
2.2.	Ecuaciones Estocásticas	46
2.2.1.	Ecuaciones Estocásticas para Densidades	47
2.3.	Teoría de Filtrado Óptimo	54
2.3.1.	Filtro de Wiener	54
2.3.2.	Filtro de Kalman (Tiempo Discreto)	57
2.3.3.	Filtro de Kalman-Bucy (Tiempo Continuo)	58
2.3.4.	Ecuación General de Filtrado Óptimo	60
2.4.	Teoría de Control Óptimo	70
2.4.1.	Principio del Máximo de Pontryagin	70
2.4.2.	Programación Dinámica	73
2.4.3.	Regulador Lineal Óptimo	75
2.4.4.	Controlador Lineal Óptimo	83
2.5.	Teoría de Vibrosoluciones	86
3.	Control Óptimo en Sistemas de Itô-Volterra	90
3.1.	Control Óptimo en Sistemas Continuos de Itô-Volterra	90
3.1.1.	Planteamiento del Problema	90
3.1.2.	Principio de Dualidad	91
3.1.3.	Solución al Problema Dual de Filtrado	92
3.1.4.	Solución al Problema de Control Óptimo para Sistemas Continuos de Itô-Volterra	94
3.2.	Control Óptimo en Sistemas Discontinuos de Itô-Volterra	95
3.2.1.	Planteamiento del problema	95
3.2.2.	Solución al Problema de Filtrado	96

3.2.3.	Solución al Problema de Control	98
3.3.	Control Óptimo en la Planta Dinámica	102
3.3.1.	Planteamiento del Problema	102
3.3.2.	Solución	103
3.4.	Ejemplo: Movimiento de un Misil con Motores Jet e Impulsivo	104
3.4.1.	Planteamiento del Problema	104
3.4.2.	Solución	106
4.	Controlador Óptimo para Sistemas no Observables de Itô-Volterra	109
4.1.	Controlador Óptimo para Sistemas Continuos de Itô-Volterra	109
4.1.1.	Planteamiento del Problema	109
4.1.2.	Principio de Separación en Sistemas Integrales	110
4.1.3.	Solución del Problema de Control Óptimo	112
4.2.	Controlador Óptimo en Sistemas no Observables y Discontinuos de Itô-Volterra	113
4.2.1.	Planteamiento del Problema	113
4.2.2.	Principio de Separación en Sistemas Integrales Discontinuos	115
4.2.3.	Solución al Problema de Control para Sistemas Discontinuos	117
4.2.4.	Ecuaciones de los Saltos	118
4.3.	Controlador Óptimo para la Planta Dinámica	124
4.3.1.	Planteamiento del Problema	124
4.3.2.	Solución	125
4.3.3.	Saltos para la Planta Dinámica	127
4.4.	Movimiento de un Misil con Motores Jet e Impulsivo y Velocidad no Observable	128
4.4.1.	Planteamiento del Problema	128

4.4.2. Solución	130
5. Filtrado Óptimo en Sistemas Polinomiales	135
5.1. Filtrado Óptimo para Ecuaciones de Estado y de Observaciones Lineales	135
5.1.1. Planteamiento del Problema	135
5.1.2. Solución	136
5.2. Ecuación de Kushner para el Estado no Lineal y Observaciones lineales	137
5.2.1. Planteamiento del Problema	137
5.2.2. Solución	137
5.3. Filtro Óptimo Polinomial para la Ecuación de Estado de Tercer Grado y Observaciones Lineales	139
5.3.1. Planteamiento del Problema	139
5.3.2. Solución	139
5.4. Filtro Óptimo para Ecuaciones de Estado Polinomial de Cuarto Grado y Observaciones Lineales	144
5.4.1. Planteamiento del Problema	144
5.4.2. Solución	145
5.5. Aplicación del Filtro Óptimo Polinomial a un Sistema Automotriz	146
5.5.1. Planteamiento del Problema	146
5.5.2. Solución	147
6. Ecuaciones del Filtro para Ecuaciones de Estado Bilineales y su Aplicación a la Estimación de un Proceso de Polimerización	155
6.1. Ecuaciones del Filtro para Ecuaciones de Estado Bilineales	155

6.1.1.	Planteamiento del Problema	155
6.1.2.	Solución	156
6.2.	Aplicación del Filtro Bilineal a la Estimación de un Proceso de Polimerización	157
6.2.1.	Planteamiento del Problema	157
6.2.2.	Solución	160
7.	Control Óptimo en Sistemas Polinomiales	166
7.1.	Control Óptimo para un Estado Polinomial de Tercer Grado con Entrada Lineal de Control	166
7.1.1.	Planteamiento del Problema	166
7.1.2.	Solución	167
7.2.	Aplicación del Regulador Óptimo Polinomial de Tercer Grado a un Sistema Automotriz	169
7.2.1.	Planteamiento del problema	169
7.2.2.	Solución	171
8.	Controlador Óptimo en Sistemas Polinomiales	176
8.1.	Problema del Controlador Óptimo	176
8.1.1.	Planteamiento del Problema	176
8.1.2.	Principio de Separación para Sistemas Polinomiales	177
8.1.3.	Solución al Problema de Control Óptimo	180
8.2.	Aplicación del Controlador Polinomial Óptimo a un Sistema Automotriz	181
8.2.1.	Planteamiento del problema	181
8.2.2.	Solución	183
9.	Conclusiones, Aportaciones y Recomendaciones para Trabajos Futuros	189
9.1.	Conclusiones	189

9.2. Aportaciones	190
9.3. Recomendaciones para Trabajos Futuros	192
Referencias Bibliográficas	194