

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Hipótesis	3
1.2. Objetivos	3
1.3. Alcances	4
1.4. Estructura de la tesis	4
2. Identificación de sistemas con incertidumbre paramétrica	6
2.1. Identificación de sistemas	6
2.1.1. Etapas en la identificación de sistemas	7
2.1.2. Tipos de modelos	9
2.1.3. Identificación de modelos difusos	11
2.2. Identificación de sistemas en tiempo continuo	15
2.3. Análisis de estabilidad de sistemas	19
2.3.1. Sistemas Lineales	20
2.3.2. Sistemas No Lineales	21
2.4. Sistemas con incertidumbre paramétrica	23
2.4.1. Intervalos difusos	25
2.4.2. Plantas de intervalos	26
2.5. Discusión	27
3. Diseño de controladores difuso robustos	28
3.1. Control robusto	28
3.1.1. Las normas \mathcal{H}_2 y \mathcal{H}_∞ y su relación con el control robusto	29
3.1.2. Control \mathcal{H}_∞	30
3.2. Control robusto ante incertidumbre paramétrica	33
3.2.1. Teorema de Kharitonov	33
3.2.2. Teorema Generalizado de Kharitonov	35
3.3. Usos del control robusto ante incertidumbre paramétrica y control \mathcal{H}_∞	39
3.4. Control difuso robusto	41
3.5. Diseño propuesto de controladores difuso robustos	43
3.5.1. Identificación de modelos con incertidumbre paramétrica	43
3.5.2. Diseño de control propuesto	44
3.6. Estabilidad en modelos difusos Takagi & Sugeno con incertidumbre paramétrica	46
3.7. Discusión	49
4. Análisis y modelación de la planta de colectores solares	50
4.1. Control avanzado en plantas solares	50
4.2. Descripción del proceso	52
4.3. Modelación de la planta solar	53

4.3.1.	Modelo fenomenológico	54
4.3.2.	Controlador Feedforward	55
4.3.3.	Simulador de la planta de colectores solares	57
4.4.	Identificación difusa en tiempo continuo	58
4.5.	Identificación de intervalos difusos	63
4.6.	Discusión	65
5.	Controladores difuso robustos para la planta de colectores solares	67
5.1.	Bases de evaluación	68
5.1.1.	Escenarios de prueba	68
5.1.2.	Funciones de fitness para el diseño de controladores	71
5.1.3.	Índices de desempeño	72
5.2.	Control proporcional integral difuso robusto	73
5.2.1.	Resultados en escenario 1: día soleado (sin nubes)	76
5.2.2.	Resultados en escenario 2: día nublado	79
5.2.3.	Evaluación de la robustez global de los controladores	82
5.3.	Control difuso robusto por realimentación de estados	84
5.3.1.	Especificaciones de diseño	84
5.3.2.	Resultados en escenario 1: día soleado (sin nubes)	87
5.3.3.	Resultados en escenario 2: día nublado	89
5.3.4.	Evaluación de la robustez global de los controladores por realimentación	92
5.4.	Prueba de controladores ante otro set de datos	93
5.5.	Control difuso \mathcal{H}_∞	94
5.5.1.	Especificaciones de diseño	94
5.5.2.	Resultados en escenario 1: día soleado (sin nubes)	96
5.5.3.	Resultados en escenario 2: día nublado	97
5.6.	Discusión	99
5.7.	Alcances del trabajo a la realidad chilena	102
6.	Conclusiones	104
6.1.	Aportes de la tesis	106
6.2.	Trabajo futuro	106
6.3.	Publicaciones generadas	107
6.4.	Estadía de investigación	107
	Bibliografía	108
7.	Anexos	114
7.1.	Anexo A: Representación de sistemas en variables de estado	114
7.2.	Anexo B: Análisis de controlador difuso robusto por realimentación de estados con acción integral	115
7.3.	Anexo C: Criterio de Routh-Hurwitz en controladores difuso robustos y análisis de estabilidad global	116
7.3.1.	Control PI difuso robusto	116
7.3.2.	Control por realimentación de estados difuso robusto	119
7.4.	Anexo D: Consideraciones de desempeño de sistemas	120
7.5.	Anexo E: Optimización por enjambre de partículas	121
7.6.	Anexo F: Diseño de controladores para sistemas lineales	123
7.6.1.	Diseño por ubicación de polos	123
7.6.2.	Diseño de controladores en frecuencia: Criterio de Nyquist	123
7.7.	Anexo G: Diseño de controlador robusto clásico	124

Índice de tablas

2.1. Criterio Routh-Hurwitz	20
3.1. Porcentaje de datos cubiertos según el valor de β	44
5.1. Parámetros del algoritmo PSO utilizados	73
5.2. Parámetros de los controladores PI difuso robustos	75
5.3. Resultados de los controladores para cada nivel de referencia	77
5.4. Flujo en cada nivel de referencia	78
5.5. Resultados de los controladores ante perturbaciones	81
5.6. Flujo ante perturbaciones	82
5.7. Parámetros de controladores difuso robustos por realimentación de estados	86
5.8. Resultados controladores difuso robustos por realimentación de estados	88
5.9. Flujo en cada nivel de referencia (controladores por realimentación)	89
5.10. Resultados de los controladores por realimentación de estado ante perturbaciones	90
5.11. Acción de control ante perturbaciones (Controlador por realimentación de estados)	92
5.12. Resumen de resultados de validación	93
5.13. Resultados controlador difuso \mathcal{H}_∞ (día soleado)	96
5.14. Flujo inyectado (Controlador \mathcal{H}_∞)	97
5.15. Resumen de ventajas y desventajas de los controladores propuestos	101
7.1. Criterio Routh-Hurwitz para PI difuso robusto	117

Índice de figuras

2.1.	Señal APRBS con 7 niveles de amplitud	8
2.2.	Proyección de 3 clusters en 2 variables de entrada [1]	15
2.3.	Esquema básico de SVF	19
3.1.	Esquema de planta sometida a perturbaciones	29
3.2.	Sistema perturbado bajo la acción de un controlador $K(s)$	31
3.3.	Propuesta de diseño de controladores difuso robustos	46
4.1.	Campo de colectores solares [2]	53
4.2.	Configuraciones para la implementación de bloque de prealimentación	56
4.3.	Simulador de la planta de colectores solares en Simulink	57
4.4.	Esquema del proceso que se desea identificar	58
4.5.	Diagrama de Bode para la Planta de Colectores Solares	59
4.6.	Identificación de planta solar utilizando SVF	59
4.7.	Experimento de identificación. Arriba: Señal de entrada. Abajo: Respuesta del sistema	60
4.8.	Funciones de pertenencia para la entrada filtrada u_f	62
4.9.	Funciones de pertenencia para la salida derivada filtrada \dot{y}_f	62
4.10.	Desempeño del Modelo Difuso de la Planta Solar	63
4.11.	Intervalo difuso con 95 % de confianza	65
5.1.	Esquema general de la implementación de controladores difuso robustos	67
5.2.	Desempeño de controlador PI de parámetros fijos	69
5.3.	Perfil de radiación solar en día soleado	70
5.4.	Perfil de radiación solar en día nublado	70
5.5.	Resultados utilizando el enfoque PI difuso robusto	75
5.6.	Esquemas PI difuso robustos y control PI clásico	76
5.7.	Comparación de flujo de aceite requerido a la bomba por cada controlador	78
5.8.	Comparación esquemas difuso robustos y controlador clásico para día con nubes	79
5.9.	Acercamiento desempeño de controladores ante perturbaciones. Izquierda: Perturbación inicial. Medio: Segunda perturbación. Derecha: Tercera perturbación	80
5.10.	Flujo inyectado por la bomba para el caso de día con nubes	81
5.11.	Controladores difuso robustos por realimentación de estados en día soleado	87
5.12.	Flujo de aceite controladores difuso robustos por realimentación de estados (día soleado)	88
5.13.	Desempeño de controladores difuso robustos por realimentación de estados	90
5.14.	Flujo de aceite para prueba de controladores difuso robustos por realimentación de estados	91
5.15.	Diagrama de Bode para $W_1^{-1}(s)$	94
5.16.	Diagrama de Bode para $W_3^{-1}(s)$	95
5.17.	Controlador \mathcal{H}_∞ difuso robusto (día soleado)	96

5.18. Flujo de aceite inyectado (día soleado)	97
5.19. Controlador \mathcal{H}_∞ difuso robusto (día nublado)	98
5.20. Flujo de aceite inyectado (día nublado)	98
7.1. Diagrama de bloques para controlador por realimentación de estados y acción integral	115
7.2. Especificaciones de la respuesta transitoria de un sistema [3]	121
7.3. Diagrama de bloques aumentado para control \mathcal{H}_∞	125