

# Índice de contenidos

---

Resumen	1
---------	---

---

Resum	3
-------	---

---

Abstract	5
----------	---

---

I Introducción	7
----------------	---

1 Motivación y Objetivos	9
--------------------------	---

---

1.1 Introducción . . . . .	9
1.2 Antecedentes . . . . .	10
1.3 Motivación y Objetivos . . . . .	14
1.4 Control Predictivo como Filosofía de Diseño . . . . .	17
1.4.1 Predictor . . . . .	21
1.4.2 Función de coste . . . . .	23
1.4.3 Optimizador . . . . .	25

1.5	Evolución del CPBM . . . . .	26
1.6	Estructura de la Tesis . . . . .	34
	Bibliografía . . . . .	36

## **II Estado del Arte: Modelado e Identificación No Lineal 43**

### **2 Representación de Sistemas No Lineales 45**

---

2.1	Introducción . . . . .	45
2.2	Modelos en Primeros Principios . . . . .	46
2.3	Modelos con Redes Neuronales . . . . .	47
2.3.1	Redes Recurrentes . . . . .	48
2.4	Modelos de Volterra . . . . .	49
2.4.1	Modelos de Hammerstein . . . . .	50
2.4.2	Modelos de Wiener . . . . .	50
2.5	Red de Modelos Locales . . . . .	51
2.6	Modelos Lineales de Parametros Variables . . . . .	53
2.6.1	Dependencia Lineal Fraccional . . . . .	54
2.6.2	Dependencia Afín . . . . .	54
2.7	Modelos Borrosos . . . . .	55
2.7.1	Modelos Lingüísticos . . . . .	55
2.7.2	Modelos Relacionales . . . . .	58
2.7.3	Modelos Takagi-Sugeno . . . . .	58
2.7.3.1	Inferencia de los modelos Takagi-Sugeno . . . . .	60
2.7.4	Modelos Dinámicos Borrosos . . . . .	62
2.7.4.1	Espacio de Estados . . . . .	62
2.7.4.2	Entrada-Salida . . . . .	63

Bibliografía . . . . .	64
<b>3 Identificación de Sistemas Borrosos</b>	<b>67</b>
3.1 Introducción . . . . .	67
3.2 Identificación a partir de ecuaciones no lineales . . . . .	68
3.2.1 Sectorización de no linealidades . . . . .	69
3.3 Identificación a partir de datos experimentales . . . . .	70
3.3.1 Agrupamiento Borroso (Product Space Clustering) . . . . .	71
3.3.2 Neural Learning . . . . .	74
Bibliografía . . . . .	75
<b>4 Aplicación de Modelado e Identificación</b>	<b>77</b>
4.1 Introducción . . . . .	77
4.2 Aplicación de la Sectorización No Lineal . . . . .	79
4.3 Aplicación de <i>Product Space Clustering</i> . . . . .	86
4.3.1 Selección de la estructura . . . . .	88
4.3.2 Datos de Regresión . . . . .	91
4.3.3 Agrupación Borrosa . . . . .	92
4.3.4 Funciones de Pertenencia de los Antecedentes . . . . .	92
4.3.5 Parámetros de los Consecuentes . . . . .	94
4.3.6 Implementación . . . . .	96
4.3.7 Resultados Obtenidos . . . . .	97
4.4 Conclusiones . . . . .	98
Bibliografía . . . . .	100

**III Estado del Arte: Control Borroso mediante LMIs 101**

**5 Control Borroso PDC y Predictivo 103**

---

5.1 Introducción . . . . . 103

5.2 Controladores Borrosos PDC . . . . . 104

5.3 Condiciones de Estabilidad . . . . . 107

    5.3.1 Definición de LMI . . . . . 108

    5.3.2 LMIs en Ingeniería de Control . . . . . 109

5.4 Diseño de Controladores Borrosos mediante LMIs . . . . . 111

    5.4.1 Controlador Borroso PDC Estabilizante . . . . . 111

    5.4.2 Controlador PDC Óptimo . . . . . 112

    5.4.3 Otras Especificaciones de diseño . . . . . 114

        5.4.3.1 Tasa de Convergencia (Decay Rate) . . . . . 115

        5.4.3.2 Restricciones en la acción de control . . . . . 116

        5.4.3.3 Restricciones en la salida . . . . . 117

        5.4.3.4 Independencia del vector de estados inicial . . . . . 117

5.5 Control Predictivo Borroso . . . . . 118

    5.5.1 Optimización No Convexa . . . . . 120

    5.5.2 Optimización Convexa . . . . . 121

5.6 Conclusiones . . . . . 123

Bibliografía . . . . . 124

**6 Aplicación Control Borroso Mediante LMIs 127**

---

6.1 Introducción . . . . . 127

    6.1.1 Modelo Borroso Identificado . . . . . 128

6.1.2 Validación del Modelo . . . . .	136
6.2 Controlador Borroso Óptimo . . . . .	139
6.2.1 Diseño del Controlador mediante LMIs . . . . .	140
6.3 Validación de Resultados . . . . .	143
6.4 Conclusiones . . . . .	147
Bibliografía . . . . .	148

## **IV Propuestas en Identificación y Control Predictivo Borroso 149**

<b>7 Propuesta para Identificación de Predictores Borrosos</b>	<b>151</b>
--	------------

7.1 Introducción . . . . .	151
7.2 Descripción conceptual del método . . . . .	154
7.3 Algoritmo desarrollado . . . . .	156
7.3.1 Inicialización y selección de los parámetros de diseño . . . . .	158
7.3.1.1 Datos de identificación . . . . .	158
7.3.1.2 Estructura del predictor borroso . . . . .	158
7.3.1.3 Actualización mediante algoritmos genéticos . . . . .	163
7.3.2 Identificación del Modelo Precursor . . . . .	163
7.3.3 Respuesta Local del Sistema . . . . .	167
7.3.4 Respuesta No Local del Sistema . . . . .	168
7.3.5 Actualización mediante Algoritmos Genéticos . . . . .	171
7.3.5.1 Definición del Algoritmo Genético Empleado . . . . .	172
7.3.5.2 Función de Coste . . . . .	175
7.3.5.3 Coste Computacional . . . . .	176
7.4 Ejemplo de identificación de un predictor FLAP . . . . .	176
7.5 Conclusiones . . . . .	186

Bibliografía . . . . .	187
<b>8 Control Predictivo Borroso Mediante Predictor FLAP</b>	<b>189</b>
8.1 Introducción . . . . .	189
8.2 Método de diseño . . . . .	190
8.3 Ejemplo de diseño . . . . .	196
8.4 Conclusiones . . . . .	198
Bibliografía . . . . .	199
<b>9 Control Predictivo Borroso Forward-Backward</b>	<b>201</b>
9.1 Introducción . . . . .	201
9.2 Aplicación del Principio de Optimalidad . . . . .	202
9.2.1 Formulación Matemática . . . . .	205
9.3 Descripción del algoritmo de diseño . . . . .	212
9.4 Restricciones en las variables . . . . .	214
9.4.1 Restricciones en las acciones de control . . . . .	214
9.4.2 Restricciones en las salidas . . . . .	219
9.5 Ejemplo de aplicación . . . . .	219
9.6 Conclusiones . . . . .	227
Bibliografía . . . . .	228
<b>V Conclusiones y Bibliografía</b>	<b>229</b>
<b>10 Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	<b>231</b>
10.1 Conclusiones y Contribuciones . . . . .	231

10.2 Trabajos Futuros . . . . .	234
Bibliografía . . . . .	235
<b>Resumen Bibliográfico</b>	<b>237</b>

---