

# Índice

<b>Objeto del proyecto .....</b>	<b>7</b>
<b>1. Contexto y estado del arte del proyecto .....</b>	<b>9</b>
1.1. Contexto. El proyecto europeo <i>MOBY-DIC</i> .....	9
1.2. Estado del arte: funciones <i>PWA</i> .....	10
1.2.1. Definiciones básicas .....	10
1.2.2. Funciones <i>PWA</i> simplificadas ( <i>PWAS</i> ).....	11
1.2.3. Evaluación de funciones <i>PWA</i> .....	13
1.3. Uso de funciones <i>PWA</i> en controladores.....	14
1.4. Conclusiones.....	15
<b>2. Lógica difusa y controladores difusos .....</b>	<b>17</b>
2.1. Conjunto difuso y función de pertenencia .....	17
2.2. Variables lingüísticas.....	18
2.3. Reglas difusas.....	19
2.4. Técnicas de razonamiento aproximado .....	20
2.5. Mecanismos de inferencia.....	21
2.6. Métodos de <i>defuzzificación</i> .....	22
2.7. Sistemas difusos <i>Takagi-Sugeno</i> .....	23
2.8. Sistemas difusos y funciones <i>PWA</i> .....	24
2.9. Conclusiones.....	25
<b>3. Herramientas de CAD: Flujo de diseño .....</b>	<b>27</b>
3.1. Extracción de bases de reglas a partir de datos numéricos.....	27
3.1.1. Métodos de clustering.....	27
3.1.2. Métodos de tipo <i>grid</i> .....	30
3.1.3. Ajuste fino a los datos numéricos .....	31
3.2. Simplificación de sistemas difusos.....	31
3.2.1. Simplificación de funciones de pertenencia.....	32
3.2.2. Simplificación de reglas .....	33

3.3. Aproximación para facilitar la implementación <i>hardware</i> .....	33
3.3.1. Técnica de simplificación tabular .....	34
3.4. Arquitectura de sistemas difusos basados en reglas activas.....	35
3.5. Síntesis de sistemas difusos con System Generator .....	36
3.6. Flujo de diseño .....	39
3.7. Conclusiones.....	41
<b>4. Diseño de controladores empotrados jerárquicos.....</b>	<b>43</b>
4.1. Diseño de controladores difusos jerárquicos .....	43
4.2. Estructura básica de un controlador jerárquico difuso - <i>PWA</i> .....	44
4.3. Caso de estudio: Doble integrador.....	45
4.3.1. Descripción de los datos: Doble integrador .....	45
4.3.2. Diseño de un controlador difuso sin jerarquía .....	46
4.3.3. Diseño de un controlador difuso con jerarquía .....	50
4.3.4. Simulación con la herramienta <i>Xfmt</i> de <i>Xfuzzy</i> .....	52
4.3.5. Herramienta <i>Xfsg</i> de <i>Xfuzzy</i> .....	54
4.3.6. Comparación de resultados .....	62
4.4. Conclusiones.....	65
<b>Conclusiones .....</b>	<b>67</b>

# Lista de figuras

Figura 1. Ejemplo de un dominio bidimensional particionado en politopos.....	11
Figura 2. Ejemplo de <i>simplex</i> en 1,2 y 3 dimensiones .....	11
Figura 3. Ejemplo de un dominio bidimensional particionado en <i>simplex</i> .....	12
Figura 4. Ejemplo bidimensional de una partición no uniforme y su transformada uniforme .....	13
Figura 5. Árbol de búsqueda binaria construido a partir de la <i>Figura 1</i> .....	14
Figura 6. Ejemplo de una partición simplicial uniforme .....	14
Figura 7. Representación gráfica de conjuntos clásicos (a) y difusos (b).....	17
Figura 8. Funciones de pertenencia más utilizadas: (a) Triangular (b) Trapezoidal .....	18
Figura 9. Definición de la variable lingüística "Error".....	19
Figura 10. Mecanismo de inferencia <i>Min-Max</i> o de <i>Mamdani</i> .....	22
Figura 11. Familia B-Spline de orden cero (a), uno (b) y dos (c).....	24
Figura 12. Relación entre una función de pertenencia y la función que implementa .....	25
Figura 13. Ejemplos de funciones de pertenencia que presentan claras redundancias.....	32
Figura 14. Grado de similitud: (a) Dos conjuntos difusos sin ningún grado de igualdad (b) Conjuntos difusos solapados con un alto grado de igualdad .....	33
Figura 15. Numeración para las funciones de pertenencia de un tipo: (a) Numeración correcta; (b) Numeración incorrecta .....	34
Figura 16. Base de reglas de partida (a) y agrupación de implicantes primos (b).....	35
Figura 17. Estructura general de la arquitectura .....	35
Figura 18. Conjunto de bloques de la librería de módulos <i>XfuzzyLib</i> .....	36
Figura 19. Símbolo y ventana de parámetros del módulo <i>A_MF</i> .....	37
Figura 20. Diagrama de bloques del defuzzificador <i>FuzzyMean</i> .....	38
Figura 21. <i>FLC</i> de 2 entradas con Producto y <i>FuzzyMean</i> Simplificado.....	38
Figura 22. <i>FLC</i> de 2 entradas con Producto y <i>WeightedFuzzyMean</i> .....	39
Figura 23. Parámetros de un <i>FLC2_P_FMs</i> y definición mediante fichero '.m'.....	39
Figura 24. Flujo de diseño .....	40
Figura 25. Definición de un sistema jerárquico usando módulos difusos: <i>First_System</i> y <i>Second_System</i> y de módulos no difusos: <i>Resta</i> .....	43
Figura 26. Ejemplo de un sistema jerárquico .....	44
Figura 27. Sistema F1: Funciones de pertenencia de la variable $x_1$ (a) Base de reglas (b) Representación de <i>inter</i> frente a $x_1$ (c) .....	44
Figura 28. Sistema F2: Funciones de pertenencia de la variable <i>sub</i> (a) Base de reglas (b) Representación de <i>y</i> frente a <i>sub</i> (c) .....	45
Figura 29. Superficie de control del sistema jerárquico de ejemplo de la <i>Figura 26</i> (a) y su división del dominio en politopos (b).....	45
Figura 30. Configuración de la herramienta <i>Xfdm</i> .....	47
Figura 31. Vista del controlador doble integrador con la herramienta <i>Xfedit</i> .....	47
Figura 32. Vista de la superficie de control con la herramienta <i>Xfplot</i> .....	47
Figura 33. Resultado de utilizar la herramienta <i>Xfsl</i> .....	47
Figura 34. Superficie de control después de utilizar la herramienta <i>Xfsl</i> .....	48

Figura 35. Herramienta de simplificación <i>Xfsp</i> .....	48
Figura 36. Superficie de control después de usar la herramienta <i>Xfsp</i> .....	49
Figura 37. Superficie de control después de utilizar la herramienta <i>Xfsl</i> .....	49
Figura 38. Sistema jerárquico .....	50
Figura 39. Superficie de control después de utilizar la herramienta <i>Xfsl</i> en el sistema jerárquico	51
Figura 40. Superficie de control después de utilizar la herramienta <i>Xfsl</i> en el sistema jerárquico	51
Figura 41. Resultado de la simulación <i>in2</i> frente <i>in1</i> con <i>Xfsim</i> .....	53
Figura 42. Resultado de la simulación <i>in1</i> con <i>Xfsim</i> .....	53
Figura 43. Resultado de la simulación <i>in2</i> con <i>Xfsim</i> .....	53
Figura 44. Resultado de la simulación <i>out</i> con <i>Xfsim</i> .....	54
Figura 45. Vista principal de la herramienta <i>Xfsg</i> .....	54
Figura 46. Representación del sistema de control difuso mediante un modelo <i>Simulink</i> con módulos de la librería <i>XfuzzyLib</i> y el modelo del módulo <i>Resta</i> .....	55
Figura 47. Modelo en <i>Simulink</i> para la simulación en lazo abierto del controlador .....	55
Figura 48. Superficie de control simulada con el modelo generado por la herramienta <i>Xfsg</i> .....	56
Figura 49. Modelo de la planta en <i>Simulink</i> y máscara de definición de parámetros .....	56
Figura 50. Modelo para la simulación en lazo cerrado .....	56
Figura 51. Representación de <i>in2</i> frente a <i>in1</i> después de la simulación en lazo cerrado .....	57
Figura 52. Representación de <i>in1</i> después de la simulación en lazo cerrado .....	57
Figura 53. Representación de <i>in2</i> después de la simulación en lazo cerrado .....	57
Figura 54. Representación de <i>out</i> después de la simulación en lazo cerrado .....	58
Figura 55. Configuración de bloque System Generator .....	58
Figura 56. Resumen del diseño de la <i>FPGA</i> .....	59
Figura 57. Modelo <i>Simulink</i> para simulación en lazo abierto en hardware .....	60
Figura 58. Superficie de control simulada en <i>hardware</i> .....	60
Figura 59. Modelo de co-simulación en lazo cerrado .....	60
Figura 60. Representación de <i>in2</i> frente a <i>in1</i> después de la simulación <i>Hardware in the loop</i> .	61
Figura 61. Representación de <i>in1</i> después de la simulación <i>Hardware in the loop</i> .....	61
Figura 62. Representación de <i>in2</i> después de la simulación <i>Hardware in the loop</i> .....	61
Figura 63. Representación de <i>out</i> después de la simulación <i>Hardware in the loop</i> .....	62
Figura 64. División en politopos del dominio dada por <i>Hybrid Toolbox</i> .....	62
Figura 65. División en politopos del dominio dada por el sistema difuso .....	63
Figura 66. Superficie de control dada por la herramienta de <i>Bemporad</i> .....	63
Figura 67. Superficie de control dada por la <i>Toolbox Hybrid</i> superpuesta con la resultante de la simulación <i>hardware</i> del controlador difuso. ....	63
Figura 68. Simulación en lazo cerrado dada por la herramienta <i>Hybrid Toolbox</i> .....	64
Figura 69. Simulación en lazo dada por dada por la herramienta de <i>Bemporad</i> (rojo) superpuesta con la resultante de la simulación <i>hardware</i> del controlador difuso (verde) .....	64
Figura 70. Representación de <i>in1</i> después de la simulación <i>Hardware in the loop</i> (a), de la simulación de la herramienta de <i>Bemporad</i> (b) y de la simulación de <i>Xfsim</i> (c) .....	64
Figura 71. Representación de <i>in2</i> después de la simulación <i>Hardware in the loop</i> (a), de la simulación de la herramienta de <i>Bemporad</i> (b) y de la simulación de <i>Xfsim</i> (c) .....	65
Figura 72. Representación de <i>out</i> después de la simulación <i>Hardware in the loop</i> (a), de la simulación de la herramienta de <i>Bemporad</i> (b) y de la simulación de <i>Xfsim</i> (c) .....	65

# Lista de tablas

Tabla 1 . Reglas de inferencia de la lógica de proposiciones tradicional .....	20
Tabla 2 . Reglas de inferencia de la lógica difusa .....	21
Tabla 3. Base de regla <i>Takagi-Sugeno</i> de orden cero .....	24
Tabla 4. Base de regla <i>Takagi-Sugeno</i> de orden uno .....	25
Tabla 5. Errores antes y después de utilizar la herramienta <i>Xfsl</i> .....	48
Tabla 6. Errores antes y después de utilizar la herramienta <i>Xfsl</i> .....	49
Tabla 7. Errores antes y después del utilizar la herramienta <i>Xfsl</i> en el sistema jerárquico .....	50
Tabla 8. Tabla de errores antes y después de usar la herramienta <i>Xfsl</i> en el sistema jerárquico simplificado .....	51

