

ÍNDICE

PRÓLOGO	xv
PREFACIO DE LOTFI A. ZADEH	xix
FOREWORD BY LOTFI A. ZADEH	xxi
INTRODUCCIÓN	xxiii
1 El largo y tortuoso camino hacia la construcción de máquinas inteligentes	xxiii
2 Microprocesadores, computadores y cerebro	xxvi
3 Redes neuronales artificiales	xxx
4 Sistemas borrosos.....	xxxii
5 Redes neuronales y sistemas borrosos.....	xxxiii
PARTE I. REDES NEURONALES	1
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES	3
1.1 Breve introducción biológica	3
1.2 Estructura de un sistema neuronal artificial	10
1.3 Modelo de neurona artificial	13

1.3.1 Modelo general de neurona artificial	13
1.3.2 Modelo estándar de neurona artificial.....	18
1.4 Arquitecturas de redes neuronales.....	21
1.5 Modos de operación: recuerdo y aprendizaje	26
1.6 Clasificación de los modelos neuronales.....	30
1.7 Computabilidad neuronal.	32
1.8 Un ejercicio de síntesis: sistemas conexionistas.....	33
1.9 Realización y aplicaciones de los ANS.....	35
1.A Apéndice: de la neurona biológica a la artificial.	37
CAPÍTULO 2. REDES NEURONALES SUPERVISADAS.....	41
2.1 Redes unidireccionales.....	41
2.2 El asociador lineal: aprendizaje hebbiano	42
2.3 El perceptrón simple (Rosenblatt, 1959).	47
2.3.1 Algoritmo de aprendizaje del perceptrón	51
2.4 La adalina (Widrow, 1961)	55
2.4.1 Regla LMS.....	56
2.5 El perceptrón multicapa (grupo PDP, 1986)	63
2.5.1 El MLP como aproximador universal de funciones.....	64
2.5.2 Aprendizaje por retropropagación de errores (BP)	66
2.5.3 Aceleración del aprendizaje BP. Otros algoritmos	69
2.6 Capacidad de generalización de la red	71
2.7 Pinceladas sobre la relación del MLP con los métodos estadísticos	76
2.8 Ejemplos de aplicación del MLP-BP	79
CAPÍTULO 3. REDES AUTOORGANIZADAS	85
3.1 Modelos neuronales no supervisados.	85
3.2 Modelo de mapas autoorganizados (Kohonen, 1982).	88
3.2.1 Introducción a los mapas autoorganizados.....	88
3.2.2 Algoritmo de aprendizaje.....	92
3.2.3 Algunas variantes de los SOFM.....	98
3.3 Ejemplos de aplicaciones	100
3.4 SOFM: cuantificación óptima de vectores	106
3.5 Análisis formal del proceso de autoorganización.....	108
3.6 Modelos de neurona de Kohonen. Medidas de similitud.....	112
3.7 Modelos de aprendizaje en mapas autoorganizados.....	113

CAPÍTULO 4. OTROS MODELOS DE REDES NEURONALES.	121
4.1 Redes neuronales realimentadas.....	121
4.2 Modelo de Hopfield	123
4.2.1 Modelo de neurona y arquitectura. Dinámicas.....	123
4.2.2 Memoria asociativa.....	127
4.2.3 Función energía de la red.....	129
4.3 Aprendizaje en la red de Hopfield.....	132
4.3.1 Regla de Hebb.....	133
4.3.2 Reglas óptimas.....	137
4.4 Ejemplo: reconocimiento de caracteres.....	140
4.5 Neuronas estocásticas. Máquina de Boltzmann.....	142
4.6 Modelo de Hopfield analógico (continuo)	145
4.6.1 Modelo de Hopfield de neuronas continuas.....	145
4.6.2 Aplicaciones del modelo de Hopfield analógico.....	148
4.7 Funciones de base radial (RBF)	152
4.8 LVQ	158
4.9 Otros modelos de redes neuronales.....	160
CAPÍTULO 5 IMPLEMENTACIÓN DE REDES NEURONALES	161
5.1 Introducción	162
5.2 Simulación (software) de ANS.....	163
5.3 Emulación (hardware) de ANS	166
5.4 Realización hardware de ANS	168
5.5 Neurocomputadores y chips neuronales.....	169
5.5.1 Especificaciones de un neuroprocesador.....	171
5.5.2 Aspectos generales de la realización VLSI.....	174
5.6 Bloques básicos en la realización de neuroprocesadores digitales	176
5.6.1 Sistema de control.....	176
5.6.2 Unidad de proceso.	177
5.6.3 Unidad de almacenamiento.....	179
5.6.4 Unidad de comunicación.....	180
5.6.5 Arquitecturas reconfigurables	184
5.6.6 Realizaciones especiales: lógica de frecuencia de pulsos	185
5.7 Bloques básicos en la realización de neuroprocesadores analógicos.....	186
5.7.1 Unidad de proceso	187
5.7.2 Unidad de almacenamiento.....	190
5.8 ¿Realización analógica o digital?	193
5.9 Realizaciones analógicas de ANS	198

5.10 Realizaciones digitales de ANS	200
5.11 Ejemplo: neuroemulador basado en FPGA	203
5.12 Resumen. Situación comercial y tendencias.....	206

CAPÍTULO 6 APLICACIONES DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES 209

6.1 Motivación e interés del empleo de ANS.....	209
6.2 Desarrollo de una aplicación con ANS	212
6.3 Programas de simulación de ANS.....	220
6.3.1 Programas comerciales	220
6.3.2 Programas de libre distribución	222
6.4 Comparación con otras técnicas.....	223
6.4.1 Redes neuronales e inteligencia artificial.....	223
6.4.2 Redes neuronales y estadística.....	225
6.4.3 Inconvenientes de las redes neuronales.....	227
6.5 Aplicaciones reales de los ANS	228
6.5.1 Informes sobre el estado de la aplicación de ANS.....	228
6.5.2 Listado de aplicaciones.....	229
6.6 Ejemplo de aplicación de ANS: previsión de la demanda de consumo eléctrico.	235
6.7 Conclusiones	239

PARTE II. SISTEMAS BORROSOS.....241

CAPÍTULO 7. LÓGICA BORROSA..... 243

7.1 Introducción.....	244
7.2 Conjuntos borrosos.....	248
7.3 Funciones de inclusión de conjuntos borrosos.....	249
7.4 Variable lingüística.....	253
7.5 Particiones borrosas.....	254
7.6 Medidas borrosas.....	254
7.7 Operaciones borrosas	255
7.8 Inferencia borrosa.....	257
7.8.1 Principio de extensión.....	258
7.8.2 Relación borrosa.....	258
7.8.3 <i>Modus Ponens</i> Generalizado y <i>Modus Tolens</i> Generalizado. .	259
7.8.4 Implicación borrosa.....	260

7.9 Reglas borrosas	261
7.10 Dispositivos de inferencia borrosa	262
7.11 Borrosificador (<i>fuzzifier</i>)	264
7.12 Desborrosificador (<i>defuzzifier</i>)	265
7.13 Desarrollo de sistemas borrosos	266
7.14 Borrosidad y probabilidad	268
CAPÍTULO 8. SISTEMAS DE CONTROL BORROSO	269
8.1 Introducción al control borroso	269
8.2 Un primer ejemplo	271
8.3 Tipos de controladores borrosos	276
8.3.1 Controladores borrosos directos sin optimización	276
8.3.2 Controladores borrosos directos con optimización	278
8.3.3 Controladores borrosos híbridos	281
CAPÍTULO 9. APRENDIZAJE EN SISTEMAS BORROSOS	283
9.1 Introducción	283
9.2 Retropropagación (BP)	284
9.3 Algoritmos genéticos	287
9.3.1 ¿Qué optimizar?	290
9.3.2 Codificación	293
9.3.3 Operadores cruzamiento y mutación	295
9.3.4 Diseño de la función de idoneidad	297
9.4 Algoritmos genéticos desordenados	299
9.4.1 Codificación	300
9.4.2 Operadores <i>corta</i> y <i>empalma</i>	303
CAPÍTULO 10. IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS BORROSOS	305
10.1 Introducción	305
10.2 Entornos de desarrollo	307
10.2.1 Entornos de tipo matemático	311
10.2.2 Entornos de lógica borrosa	316
10.3 Codificación en C	324
10.4 Codificación en C++	326
10.4.1 El modelo ARS (Sistemas de Respuesta Autónoma)	326
10.4.2 Objeto <i>Vinculo</i>	330
10.4.3 Objeto <i>World</i>	332

10.4.4 Objeto <i>FEN</i> (red borrosa equivalente).....	332
10.4.5 Objeto <i>ANN</i>	334
10.5 Realización hardware de sistemas borrosos. Aceleradores	334
CAPÍTULO 11. APLICACIONES DE LOS SISTEMAS BORROSOS.....	341
11.1 Introducción. <i>Soft computing</i> , o imitando a la naturaleza	341
11.2 Interés del empleo de la lógica borrosa. Fusión de tecnologías.....	342
11.3 Algunas aplicaciones de los sistemas borrosos	344
11.4 Robots móviles y navegación autónoma	345
11.5 Conclusión final	348
APÉNDICES	
A. CONTENIDO DEL CD-ROM.....	351
B. RECURSOS EN INTERNET	353
BIBLIOGRAFÍA	357
ÍNDICE ALFABÉTICO	391