

# Índice de contenidos



# Índice general

<b>I</b>	<b>Estado del arte</b>	<b>7</b>
<b>1.</b>	<b>Diagnóstico de fallos: generalidades</b>	<b>9</b>
1.1.	Introducción . . . . .	9
1.2.	Adquisición de la información . . . . .	9
1.2.1.	Fiabilidad de la información . . . . .	10
1.2.2.	Incertidumbre de la información . . . . .	10
1.3.	Terminología usada en la supervisión, detección y diagnóstico de fallos . .	12
1.4.	Modelos del proceso . . . . .	13
1.4.1.	Clases de procesos . . . . .	13
1.4.2.	Modelos de conocimiento profundo o “ <i>Deep Knowledge</i> ” . . . . .	14
1.4.3.	Modelos de conocimiento superficial “ <i>Shallow Surface</i> ” . . . . .	15
1.5.	Supervisión . . . . .	16
1.6.	Generación analítica de síntomas . . . . .	17
<b>2.</b>	<b>Detección de fallos basado en modelos dinámicos</b>	<b>19</b>
2.1.	Introducción . . . . .	19
2.2.	Detección de fallos basado en el modelo . . . . .	19
2.3.	Modelado de fallos . . . . .	20
2.4.	Detección de fallos por estimación de parámetros . . . . .	22

2.4.1.	Métodos de ecuaciones de error . . . . .	22
2.4.2.	Métodos de error de salida . . . . .	24
2.5.	Detección de fallos por medio de observadores . . . . .	25
2.5.1.	Principios básicos para la construcción del generador residual en observadores . . . . .	25
2.6.	Detección de fallos con ecuaciones de paridad . . . . .	27
2.6.1.	Ecuaciones de paridad para procesos de una entrada y una salida (SISO) . . . . .	27
2.6.2.	Ecuaciones de paridad para procesos de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) . . . . .	28
2.7.	Detección de fallo falso positivo por la matriz de sensibilidad . . . . .	29
2.8.	Detección de fallos mediante el modelado de señales . . . . .	30
<b>3.</b>	<b>Lógica y sistemas borrosos: generalidades.</b>	<b>33</b>
3.1.	Introducción. . . . .	33
3.2.	Lógica binaria. . . . .	34
3.3.	Sistemas basados en reglas. . . . .	35
3.3.1.	Verificación lógica. Anomalías. . . . .	35
3.4.	Cálculo proposicional borroso. . . . .	36
3.5.	Conjuntos borrosos. . . . .	37
3.6.	Significado de la borrosidad. . . . .	38
3.7.	Sistemas basados en reglas borrosas. . . . .	41
3.7.1.	Reguladores borrosos. . . . .	42
3.8.	Incertidumbre en las medidas . . . . .	42
3.8.1.	Teoría de probabilidad . . . . .	42
3.8.2.	Teoría de posibilidad . . . . .	43
3.9.	Medidas intervalares borrosas . . . . .	44
3.9.1.	Cantidades borrosas . . . . .	44
3.9.2.	Intervalo borroso . . . . .	45
3.9.3.	Interpretación . . . . .	46
3.9.4.	Media de intervalo . . . . .	46
3.9.5.	Borrosificación . . . . .	47

<b>4. Diagnóstico basado en técnicas de Inteligencia Artificial</b>	<b>49</b>
4.1. Introducción . . . . .	49
4.2. Métodos de clasificación para el diagnóstico . . . . .	50
4.2.1. Principios del método de clasificación . . . . .	50
4.2.2. Clasificadores borrosos . . . . .	51
4.3. Métodos basados en modelos . . . . .	52
4.3.1. Técnicas de los métodos basados en el modelo . . . . .	53
4.3.2. Método basado en el modelo de eventos discretos . . . . .	53
4.4. Métodos basados en relaciones . . . . .	55
4.4.1. Método relacional borroso aplicando FMECA . . . . .	55
4.4.2. Variables de contexto no especificadas . . . . .	58
4.4.3. Tasa de cobertura debil . . . . .	60
<b>5. Combinación de lógica borrosa y probabilidad</b>	<b>63</b>
5.1. Introducción . . . . .	63
5.2. Teoría probabilista Bayesiana . . . . .	63
5.2.1. Corolario de probabilidad . . . . .	64
5.2.2. Corolario de probabilidad condicional . . . . .	64
5.2.3. Teorema de Bayes . . . . .	65
5.3. Teoría de evidencia . . . . .	67
5.3.1. Aplicaciones de la teoría de Dempster-Shafer . . . . .	69
5.3.2. Combinación de evidencia . . . . .	71
5.4. Generalización de la teoría de Dempster-Shafer a conjuntos borrosos . . . . .	74
5.4.1. Función de creencia generalizada . . . . .	75
5.4.2. Regla de combinación generalizada . . . . .	82

<b>6. Aportaciones en técnicas de Inteligencia Artificial para el diagnóstico</b>	<b>95</b>
6.1. Introducción . . . . .	95
6.2. Sistema experto borroso para el diagnóstico . . . . .	96
6.2.1. Introducción a un sistema de diagnóstico basado en un diccionario de fallos . . . . .	96
6.2.2. Diagnóstico lógico . . . . .	97
6.2.3. Imprecisión en las medidas . . . . .	99
6.2.4. Variables de contexto . . . . .	99
6.2.5. Diagnóstico predictivo a través de la tendencia de las variables . .	100
6.2.6. Simulación de un proceso . . . . .	101
6.2.7. Sumario sobre el sistema experto borroso . . . . .	103
6.3. Diagnóstico de sistemas mediante combinación de lógica borrosa y probabilidad . . . . .	104
6.3.1. Aplicaciones industriales de la teoría de evidencia . . . . .	104
6.3.2. Sistema que combina lógica borrosa y probabilidad . . . . .	104
6.3.3. Análisis de resultados por combinación evidencial . . . . .	109
6.3.4. Sumario de la combinación de lógica borrosa y probabilidad . . .	110
6.4. Redes Bayesianas en el diagnóstico de sistemas con aprendizaje de parámetros . . . . .	111
6.4.1. Aplicaciones industriales de las redes Bayesianas . . . . .	111
6.4.2. Caso de estudio . . . . .	112
6.4.3. Descripción breve del programa . . . . .	112
6.4.4. Diagnóstico de fallos usando una red Bayesiana . . . . .	114
6.4.5. Análisis de resultados en el diagnóstico por redes Bayesianas . . .	116

<b>7. Diagnóstico posibilístico borroso como un problema de optimización lineal</b>	<b>119</b>
7.1. Introducción . . . . .	119
7.2. Optimización lineal . . . . .	121
7.2.1. Programación lineal . . . . .	122
7.3. Definiciones básicas . . . . .	124
7.4. Metodología de diagnóstico (caso binario) . . . . .	125
7.4.1. Incorporando observaciones . . . . .	128
7.4.2. Refinamientos en la metodología . . . . .	128
7.4.3. Diagnósis basada en la consistencia . . . . .	130
7.5. El enfoque borroso . . . . .	133
7.6. Marco de trabajo Posibilístico . . . . .	136
7.7. Bases de conocimiento posibilístico . . . . .	137
7.7.1. Resultados del diagnóstico posibilístico . . . . .	141
7.8. Ejemplos adicionales . . . . .	142
7.9. Discusión comparativa . . . . .	148
<b>8. Aplicación del diagnóstico posibilístico borroso a la detección de fallos en motores de combustión interna mediante análisis de aceite</b>	<b>151</b>
8.1. Introducción . . . . .	151
8.2. Diagnóstico mediante análisis de aceite . . . . .	152
8.3. Definición de la base de conocimiento . . . . .	153
8.4. Preproceso de medidas y escenario de diagnóstico . . . . .	155
8.4.1. Preproceso de medidas . . . . .	155
8.4.2. Escenario de diagnóstico . . . . .	155
8.5. Construcción de las reglas de inferencia . . . . .	156
8.6. Diagnóstico de fallos . . . . .	159

8.6.1. Adquisición de observaciones $\sigma_j$ . . . . .	159
8.6.2. Función de optimización lineal . . . . .	163
8.6.3. Discusión sobre algunos resultados . . . . .	166
8.7. Conocimiento incierto y posibilidad condicional . . . . .	169
8.7.1. Conocimiento incierto . . . . .	169
8.7.2. Posibilidad condicional . . . . .	170
<b>III Conclusiones</b>	<b>177</b>
<b>9. Conclusiones</b>	<b>179</b>
9.1. Conclusiones del trabajo . . . . .	179
9.2. Trabajos futuros . . . . .	180



# Índice de figuras

1.1. Definición de un conjunto borroso . . . . .	11
1.2. Exactitud alcanzada por los modelos, dependiente del grado de cantidad o calidad del conocimiento del proceso . . . . .	14
1.3. Detección y diagnóstico de fallos basado en el conocimiento . . . . .	17
2.1. Detección de fallos basado en el modelo del proceso, donde $N$ son las perturbaciones . . . . .	20
2.2. Dependencia de los fallos con respecto al tiempo: a) abrupta, b)incipiente, c) intermitente . . . . .	20
2.3. Modelos básicos de fallos: a) fallos aditivos, b) fallos multiplicativos . . .	21
2.4. Modelo de proceso estático no lineal . . . . .	21
2.5. Modelo para la estimación de parámetros por ecuaciones de error . . . .	23
2.6. Modelo para la estimación de parámetros por el error de salida . . . . .	24
2.7. Observador de orden completo para la generación de residuos . . . . .	26
2.8. Observador de orden completo para la generación de residuos . . . . .	27
2.9. Ecuaciones de paridad, método de error de salida . . . . .	28
2.10. Ecuaciones de paridad, método de ecuación de error . . . . .	28
2.11. Método de ecuaciones de paridad para modelos en espacio estado MIMO; $D'$ : filtro de diferenciación . . . . .	29
2.12. Diagrama a bloques de un sistema con ubicación de la matriz de sensibilidad	30
3.1. Temperatura agradable . . . . .	37
4.1. Diagnóstico de fallos usando métodos de clasificación . . . . .	50

4.2. Funciones de membresía basadas en sigmoideal . . . . .	51
4.3. Ejemplo de árbol de clasificación . . . . .	52
4.4. Arquitectura para el diagnóstico . . . . .	54
4.5. $d$ es una explicación posible: las observaciones son consistentes con sus manifestaciones predichas, presentes y ausentes . . . . .	56
4.6. Traslape de conjuntos borrosos . . . . .	57
4.7. $d$ es una explicación relevante: algunas de las manifestaciones presentes, predichas con anterioridad, son realmente observadas en el presente . . . . .	58
4.8. Modelo relacional que muestra los efectos de contexto no especificado $M(d)^{+?}$ . . . . .	59
5.1. Particionamiento de un evento en dos subconjuntos mutuamente excluyentes	65
5.2. Ilustración del espacio muestral del ejemplo 5.1 . . . . .	66
5.3. Rueda de la fortuna dividida en tres áreas . . . . .	70
5.4. Descripción gráfica de cómo se obtiene $f_{B,A}(\alpha_i)$ . Obtención de: a) $f_{B,A}(0,25)$ , b) $f_{B,A}(0,5)$ , c) $f_{B,A}(0,75)$ , d) $f_{B,A}(1)$ . . . . .	81
5.5. Descripción gráfica de los elementos focales de $B$ y $C$ . . . . .	82
5.6. Descripción de los subconjuntos borrosos . . . . .	87
5.7. Subconjuntos usados en la combinación de dos fuentes evidenciales . . . . .	91
6.1. Funciones de pertenencia . . . . .	97
6.2. Pendientes $m_u$ y $Ff$ en la tendencia de una variable . . . . .	100
6.3. Proceso industrial a simular . . . . .	102
6.4. Fallo 4 cuando $k = 14$ . . . . .	103
6.5. Sistema de dos depósitos interconectados . . . . .	105
6.6. Funciones de pertenencia para $q_2$ . . . . .	105
6.7. Errores entre la creencia y la regla . . . . .	107
6.8. Funciones de pertenencia no borrosas $A$ y $B$ . . . . .	108
6.9. Gráfica de credibilidad y plausibilidad . . . . .	109

6.10. Estructuras de red propuestas en el aprendizaje supervisado . . . . .	113
6.11. Funciones de pertenencia que caracterizan al nivel de $h_1$ bajo y al sensor $h_1$ . . . . .	115
6.12. Gráfica de plausibilidad y credibilidad del fallo de $V_i$ . . . . .	116
7.1. Una base de conocimiento básica.( $\longrightarrow$ ) la flecha sólida: asociaciones ciertas; ( $-\ - - \rightarrow$ ) flecha discontinua: asociaciones inciertas. . . . .	126
7.2. Descripción gráfica de un problema de diagnóstico.( $\longrightarrow$ ) la flecha sólida: asociaciones ciertas; ( $-\ - - \rightarrow$ ) flecha discontinua: asociaciones inciertas; ( $\cdots*$ ) línea punteada con estrella: desigualdades (la estrella denota $a$ en $a \leq b$ ). . . . .	132
7.3. Conocimiento borroso incierto (la zona fiable aparece sombreada). . . . .	135
7.4. Distribución de posibilidad proveniente de restricciones de igualdades “suavizadas asimétricamente”. . . . .	139
7.5. Distribución de posibilidad con 4 variables artificiales: restricciones de sector suavizadas. . . . .	140
7.6. Posibilidades marginales en el caso 1. Abscisas: severidad (de izquierda a derecha: $d_1, d_2, d_3$ ); ordenadas: posibilidad . . . . .	146
7.7. Posibilidades marginales en el caso 2 . . . . .	147
7.8. Posibilidades marginales en el caso 3 . . . . .	147
8.1. Diagrama de relación causa-efecto del sistema de diagnóstico por el análisis de aceites usados . . . . .	161
8.2. Gráficas de posibilidad condicional de los desórdenes del caso <i>caso 1</i> . Abscisas: severidad; ordenadas: posibilidad . . . . .	173
8.3. Gráficas de posibilidad condicional de los desórdenes del caso <i>medidas2</i> . Abscisas: severidad; ordenadas: posibilidad . . . . .	174
8.4. Gráficas de posibilidad condicional de los desórdenes del caso <i>medidas3</i> . Abscisas: severidad; ordenadas: posibilidad . . . . .	175
8.5. Gráficas de posibilidad condicional de los desórdenes del caso <i>medidas4</i> . Abscisas: severidad; ordenadas: posibilidad . . . . .	176



# Índice de cuadros

6.1. Diccionario de fallos (límites mínimos) . . . . .	98
6.2. Diccionario de fallos (límites máximos) . . . . .	98
6.3. Límites mínimos en el diccionario para diagnóstico del sistema de depósitos	106
6.4. Límites máximos en el diccionario para diagnóstico del sistema de depósitos	106
8.1. Relación desórdenes\síntomas . . . . .	157
8.2. Casos de medidas de 5 muestras de aceite usado . . . . .	160
8.3. Donde se muestran las observaciones $\sigma_j$ . . . . .	167
8.4. Resultado de desórdenes encontrados por el sistema . . . . .	168