

---

---

## INDICE GENERAL

Capítulo 1 .....	1
1    Introducción.....	3
2    Contexto del problema y Objetivos .....	6
3    Metodología.....	8
4    Contenido y desarrollo del trabajo .....	10
Capítulo 2.....	15
1    Infraestructuras y los sistemas de la gestión de las infraestructuras.....	17
2    La renovación y las elecciones de inversión .....	20
3    La gestión de la infraestructura en las redes de agua potable.....	22
3.1    La gestión de la infraestructura (activos) " <i>Asset Management</i> ": definición... ..	22
3.2    La gestión de la infraestructura aplicada a las RAP .....	24
3.2.1    Análisis económico.....	26
3.2.2    Análisis técnico .....	27
4    Mantenimiento integral de tuberías de agua.....	28
4.1    Inspección y recolección de datos.....	29
4.2    Técnicas no destructivas de inspección y monitorización.....	30
4.3    Priorización de tuberías para análisis y selección de técnicas apropiadas .....	30
4.4    Determinación de la probabilidad de fallo en sistemas principales .....	31
5    Toma de decisiones .....	32
5.1    Consecuencia de fallos en sistemas de abastecimiento .....	32
5.2    Toma de decisiones basadas en principios económicos.....	33
6    Conclusiones.....	35
Capítulo 3.....	37
1    Funcionamiento de las redes de AP y la fiabilidad hidráulica .....	39
2    Introducción.....	39
3    El abastecimiento en las RAP.....	40
3.1    Funciones del Abastecimiento de Agua Potable.....	40
3.2    El suministro del agua potable en México.....	40
3.2.1    Provisión de servicios .....	40
3.2.2    Políticas.....	41
4    La distribución y las redes AEP.....	42
4.1    Estructura de la red RAP .....	43

4.1.1	Los conductos.....	43
4.1.2	Las bombas.....	44
4.1.3	Las válvulas.....	45
4.1.4	Los nudos .....	46
4.1.5	El rendimiento de la red.....	47
4.1.6	Los nudos a carga fija .....	48
4.1.7	Los depósitos.....	48
4.1.8	Los Embalses.....	49
5	Topología de la red RAP .....	49
5.1	Las redes ramificadas .....	49
5.2	Las redes malladas .....	49
6	La modelización hidráulica en la redes de RAP .....	50
6.1	Modelo para el dimensionado de la red.....	50
6.2	Modelo del análisis del funcionamiento hidráulico y diagnostico.....	50
6.3	Modelo para la gestión de la red .....	50
6.4	Precisión del modelo de las RAP .....	51
7	Estudio de la fiabilidad hidráulica de las redes de RAP .....	52
7.1	Modelos para la fiabilidad hidráulica de las redes de agua potable (RAP)....	54
7.1.1	Failnet-Reliab (CEMAGREF).....	54
7.1.2	Relnet (Université de Technologie de Brno) .....	55
7.1.3	Aquarel (SINTEF) .....	56
8	Toma en consideración por el efecto en la red y medida de la importancia de una tubería .....	56
8.1	Índices hidráulicos de fiabilidad .....	57
8.2	Índice de criticidad hidráulica.....	58
8.3	Índice de deficiencia a los nudos .....	58
9	Conclusiones.....	60
Capítulo 4.....		61
Factores de Influencia y los Modelos de Ayuda a la Decisión .....		61
1	Factores de influencia en los fallos de las tuberías .....	63
1.1	Indicadores estructurales .....	68
1.1.1	La edad y el periodo de instalación .....	68
1.1.2	Número de roturas previas .....	69

1.1.3	Corrosión.....	70
1.1.4	Diámetro .....	70
1.1.5	Longitud de la tubería.....	70
1.1.6	Material de la tubería.....	71
1.2	Variaciones temporales .....	71
1.2.1	Condiciones del suelo .....	72
1.2.2	Proximidad en las excavaciones.....	72
1.2.3	Presión .....	72
1.2.4	Uso del suelo .....	72
1.3	Fiabilidad de las redes de distribución de agua .....	72
2	Modelos para la renovación de redes de agua (RAP) .....	76
3	Las aproximaciones para la jerarquización de las tuberías .....	76
3.1	Modelos basados en la previsión de fallos .....	76
3.2	Modelos por cadenas de Markov .....	77
3.3	Modelos por Proceso de Poisson no homogéneo (NHPP) .....	77
3.4	Modelo por análisis de supervivencia .....	78
4	Discusión.....	79
5	Análisis multicriterio.....	79
6	El modelo de optimización de la fecha de renovación.....	81
7	Modelos de optimización con la ayuda de métodos exactos.....	81
7.1	El modelo de referencia.....	81
7.1.1	Discusión.....	82
7.2	El Modelo MNRAP (Multistage Network Rehabilitation Analysis Procedure) .....	82
7.3	Modelos de optimización por métodos de cohortes.....	83
7.4	Modelo de optimización por <i>Branch and Bound</i> .....	83
7.5	Modelo de optimización por métodos no exactos.....	84
8	Los modelos de ayuda a la decisión.....	84
8.1	Modelo KANEW .....	84
8.2	Modelo UtilNets.....	84
8.3	Modelo WLC (Whole Life Costing) .....	85
8.4	Modelo PARMS ( <i>Pipeline Asset and Risk Management System</i> ) .....	86
8.5	Modelo CARE-W ( <i>Computer Aided Rehabilitation of Water Networks</i> ) .....	86

9	Conclusión.....	87
	Capítulo 5.....	89
1	Elección de criterios e identificación de alternativas.....	91
2	Modelo de la red de distribución de agua potable de Celaya.....	92
2.1	Asignación de las pérdidas volumétricas debidas a las fugas en la red.....	98
2.1.1	Corrección de la demanda mediante el rendimiento. ....	98
2.1.2	Representación de las fugas como consumos dependientes de la presión. .....	98
2.1.3	Asignación del caudal de fugas mediante un caudal medio constante... ..	99
2.1.4	Comparación de los distintos métodos propuestos.....	99
2.1.5	Ejemplo de la aplicación del modelo en el sector centro.....	99
3	Determinación de los factores de influencia .....	106
3.1	Criterios Básicos .....	107
3.1.1	La edad y el periodo instalación de la tubería.....	107
3.1.2	Número de roturas acaecidas .....	107
3.2	Criterios Funcionales.....	108
3.2.1	Disminución de la capacidad hidráulica de la tubería .....	108
3.2.2	Índice de deficiencia en los nodos.....	108
3.2.3	Impacto del caudal fugado en el comportamiento de la red, comparado con un nivel de eficiencia optimo. ....	108
3.3	Criterios Misceláneos .....	109
3.3.1	Tiempo de renovación óptimo de la tubería según Shamir-Howard....	109
3.3.2	Influencia de un corte de agua en los diferentes tipos de usuarios de la red de distribución de agua:.....	109
3.3.3	Impacto de una rotura en el medio ambiente .....	110
4	Identificación de alternativas: tuberías objeto de estudio .....	110
5	Evaluación de las tuberías seleccionadas según los criterios definidos.....	111
5.1	Criterios Básicos .....	111
5.1.1	La edad y el periodo de instalación de la tubería .....	111
5.1.2	Historial de fugas de cada tubería .....	113
5.2	Criterios Funcionales.....	114
5.2.1	Capacidad de transporte de cada tubería.....	114
5.2.2	Índice de deficiencia en los nodos.....	116

5.2.3	Impacto del caudal fugado en el comportamiento de la red, comparado con un nivel de eficiencia optimo. ....	118
5.3	Criterios Misceláneos .....	120
5.3.1	Tiempo de renovación óptimo de la tubería según Shamir-Howard....	120
5.3.2	Influencia de un corte de agua en los diferentes tipos de usuarios de la red de distribución de agua.....	123
5.3.3	Impacto de una rotura en el medio ambiente .....	127
<b>Capitulo 6.....</b>		<b>129</b>
1	Modelo de Vulnerabilidad.....	131
1.1	Herramientas a utilizar .....	133
1.2	Información necesaria .....	133
2	Metodología para la priorización del grupo de tuberías.....	134
2.1	Metodología para la asignación de prioridades de renovación de tuberías mediante el uso del sistema soporte a la toma de decisión de las sumas ponderadas .....	135
2.2	Métodos de solución.....	135
2.2.1	Métodos basados en el concepto de eficiencia de Pareto. ....	136
2.2.2	Matriz de ponderación de alternativas.....	136
3	Valoración final de los resultados.....	137
3.1	Aplicación del sistema soporte a la decisión de las sumas ponderadas para la asignación de prioridades de renovación en ocho grupos tuberías de la red de Celaya, Gto. México.....	138
3.1.1	Agrupación de puntuaciones parciales de cada tubería respecto a cada uno de los criterios considerados.....	138
3.1.2	Análisis de sensibilidad de los resultados ante variaciones en la consideración de los valores en los pesos de los criterios.....	141
3.1.3	Función Objetivo .....	143
3.1.4	Método de Ordenar .....	143
4	Modelo de Eficiencia.....	144
4.1	Determinación de la relación del coste de energía y las fugas en las tuberías .....	145
4.1.1	Pérdida de agua y las relaciones energéticas en una tubería con fuga .	146
4.1.2	Formulaciones para una tubería con múltiples fugas .....	149

4.1.3	Coste de la energía de una red con fugas .....	151
4.2	Riesgo y sus consecuencias .....	160
4.2.1	Identificación del riesgo.....	161
4.2.2	Estimación de probabilidades.....	162
4.2.3	Estimación de las consecuencias .....	163
4.2.4	Estimación del riesgo.....	163
4.2.5	Análisis de riesgo de fallo en las redes de distribución de agua .....	164
4.2.6	El marco propuesto .....	165
4.3	Desarrollo del cálculo de la priorización.....	168
4.3.1	Calculo del caudal fugado.....	171
4.3.2	Calculo del riesgo de la consecuencia de fallo.....	172
4.3.3	Comentario.....	178
4.3.4	Función Objetivo .....	178
4.3.5	Método “recipe” (receta) y obtención de resultados .....	180
<b>Capítulo 7</b> .....		<b>183</b>
1	Análisis de supervivencia.....	185
1.1	Conceptos básicos del análisis de supervivencia .....	185
1.1.1	Tiempo de fallos y de interfallos .....	185
1.1.2	Disponibilidad de datos incompletos de fallos.....	186
1.2	Métodos de análisis de supervivencia .....	187
1.2.1	Función de supervivencia .....	188
1.2.2	La función de distribución acumulativa.....	188
1.2.3	Función de riesgo (hazard function).....	189
1.3	Modelos de riesgos proporcionales de Cox´s .....	191
1.4	Modelos de distribución de Weibull .....	193
1.5	Modelo de riesgo proporcional estratificado .....	195
1.6	Proceso de Poisson no Homogéneo (NHPP).....	196
2	Conceptos generales de estadística .....	196
2.1	Índice de riesgo (HR) .....	196
2.2	Contrastes de hipótesis para el modelo de Cox .....	197
2.2.1	Test de razón de verosimilitud .....	197
2.2.2	Test de Wald .....	197
2.2.3	Test de puntajes (score test).....	198

3	La aplicación de los análisis de supervivencia en los sistemas de distribución y valoración de los resultados obtenidos .....	198
3.1	Andreou (1986,1986 <sup>a</sup> ), Marks (1998). .....	199
3.2	Eisenbeis(1994, 1999), Le Gatt (2000) .....	199
3.3	Malandain (1998, 1999) .....	202
3.4	Rostum (2000).....	202
3.5	Resumen de todos los estudios relacionados .....	202
4	Objetivo del Modelo .....	204
4.1	Modelación de la degradación de las redes de abastecimiento a través del análisis de supervivencia/fallo en un entorno complejo. ....	204
5	La toma de decisiones para la planeación en la rehabilitación.....	205
5.1	Análisis de la información para los modelos de riesgos proporcionales.....	206
5.2	Preparación del análisis estadístico .....	209
5.2.1	Selección de las herramientas informáticas .....	209
5.2.2	Desarrollo de la base de datos .....	210
5.2.3	Análisis Preliminar .....	216
5.2.4	Descripción estadística de las tuberías.....	222
5.2.5	Descripción estadística de las roturas .....	224
5.2.6	Descripción estadística de las tuberías y las roturas.....	227
6	Caso de Estudio .....	231
6.1	Significancia del factor de riesgo/ajustando los datos para un modelo de Cox (PHM). .....	232
6.1.1	Todos los individuos.....	233
6.1.2	Conclusión .....	237
6.2	Aplicación del modelo de Cox con ajuste de las covariables .....	237
6.3	Estratificación respecto al material .....	239
6.4	Análisis de tuberías que no son de acero (Asbesto cemento y polietileno)..	241
6.5	Análisis de las tuberías que sufren una o más roturas .....	243
6.6	Resumen de los resultados.....	243
7	Análisis de los datos para el modelo de riesgo proporcional de Weibull .....	245
7.1	Forma paramétrica de las funciones de riesgo y de supervivencia .....	245
7.2	Todos los individuos sin estratificar.....	246
7.3	Estrato de tuberías de fierro galvanizado FOGA.....	249

7.4	Estrato de tuberías de asbesto cemento y polietileno .....	250
7.5	Valoración de los residuos en el análisis de supervivencia .....	251
8	Validación del modelo de Weibull .....	254
8.1	Conclusión de los resultados con el modelo de Weibull.....	264
9	El Índice de Evaluación de las Condiciones Físicas .....	265
9.1	Todos los individuos 2000-2006.....	268
9.2	Estrato de las tuberías de fierro Galvanizado (FOGA) .....	269
9.3	Comparación entre métodos. ....	270
9.3.1	Para el estrato de los todos los individuos .....	273
9.3.2	Para el estrato de las tuberías de fierro galvanizado (FOGA).....	273
9.3.3	Para el estrato de las tuberías asbesto cemento y polietileno.....	274
9.4	Priorización del orden de las tuberías para rehabilitar, aplicando los modelos de riesgo proporcional de Cox y de Weibull.....	274
10	Nicho de oportunidades en la recolección de datos .....	280
10.1	Recomendaciones para la recolección de datos .....	282
10.2	Datos de Campo .....	289
10.3	Datos de Oficina.....	289
10.4	Datos de pruebas físicas .....	290
10.4.1	Pruebas a las tuberías.....	290
10.4.2	Prueba del suelo.....	292
11	Aplicación del modelo Integral en la toma de decisiones para la rehabilitación de tuberías .....	292
	<b>Capitulo 8</b> .....	299
1	Conclusiones.....	301
2	Desarrollos futuros.....	305
	Referencias .....	307
	Anexo 1 .....	323
	Anexo 2.....	341
	Anexo 3.....	361





---

---

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Estructura de la tesis .....	14
Figura 2. 1 Descripción del proceso de deterioro de las tuberías de agua potable (adaptado de Rajani y Kleiner, 2001) .....	19
Figura 2. 2 Tipos de inversiones.....	21
Figura 2. 3 El proceso del Asset Management (Adaptada de FHWA,1999 et EPA, 2003) .....	23
Figura 2. 4 La gestión de las redes de agua potable .....	25
Figura 2. 5 Instrumento de ayuda a la decisión para la gestión de la red RAP (Adaptado por Skipworth <i>et al.</i> , 2002) .....	26
Figura 2. 6 El ciclo de la gestión de tuberías (adaptado de Makar y Kleiner, 2000) ....	29
Figura 2. 7 Decisión para renovar un sistema según el coste de fallo. ....	34
Figura 2. 8 Decisión para renovar un sistema principal con alto coste de fallo .....	34
Figura 3. 1 Ejemplo de una curva característica .....	45
Figura 3. 2 Ejemplo de una curva de modulación .....	47
Figura 3. 3 Clasificación de las redes de acuerdo a sus características topológicas .....	49
Figura 3. 4 Modelo de una red de detalle y una red simplificada .....	51
Figura 3. 5 Nivel de suministro en función de la presión (Adaptado de Wagner <i>et al.</i> , 1988).....	57
Figura 3. 6 Calculo del índice de fiabilidad hidráulica.....	59
Figura 4. 1 Cargas en las tuberías utilizada en UtilNets (adaptada de Preston <i>et al.</i> , 1999). .....	73
Figura 4. 2 Tiempos de la recolección de datos .....	77
Figura 4. 3 Perfil del funcionamiento de 3 tuberías en consideración 5 criterios y 3 clases de tuberías .....	80
Figura 5. 1 Localización de la zona de estudio .....	92
Figura 5. 2 Sectores del centro con el tipo de material homogéneo .....	93

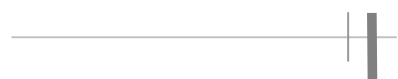
Figura 5. 3 Registro de consumo diario .....	95
Figura 5. 4 Formato para la evaluación de exactitud de los contadores .....	95
Figura 5. 5 Modelo de la red del sector centro.....	96
Figura 5. 6 Evolución de la demanda en los nodos .....	103
Figura 5. 7 Modelos hidráulicos de los cuatro sectores analizados.....	111
Figura 5. 8 Valoración de la edad de la tubería.....	113
Figura 5. 9 Macro IDN que calcula el índice de deficiencia en los nodos .....	117
Figura 5. 10 Macro IIQ que calcula el índice del impacto del $Q_{fuga}$ en la red .....	119
Figura 5. 11 Predicción de roturas en el tiempo.....	121
Figura 5. 12 Esquema de un sector de la localización geográfica de los consumidores “mayores”.....	123
Figura 5. 13 Macro IDN que calcula el índice de deficiencia en los nodos.....	126
Figura 6. 1 Estructura típica de la matriz de ponderación de alternativas .....	137
Figura 6. 2. Orden de prioridad de alternativas en función del valor de la agregación final de cada una de ellas .....	137
Figura 6. 3. Planteamiento de la función objetivo.....	143
Figura 6. 4. Celdas de priorización.....	144
Figura 6. 5 Línea del grado de energía (EGL) del segmento de una tubería con una fuga. ....	146
Figura 6. 6 Fugas relativas como una función de la pérdida de carga relativa y la localización de las fugas .....	148
Figura 6. 7 Índice de energía como una función de la localización de la fuga y la magnitud ( $\eta = 1, h_f = 0.5$ ) .....	149
Figura 6. 8 EGL para una tubería con múltiples fugas y la correspondiente fuga equivalente .....	151
Figura 6. 9 Esquema del sistema de distribución con 10 mallas .....	152
Figura 6. 10 Fugas como una función del multiplicador de la demanda $K_D$ y las propiedades del orificio, caudales del sistema total con la presión compensada. ....	153

Figura 6. 11 Respuesta del coste de la energía debido a la complejidad del sistema..	155
Figura 6. 12 Red de distribución para el sistema presentado por Walski et al (1987).	156
Figura 6. 13 Curvas de costes de mantenimiento conceptual para una tubería (o para una porción de una red de distribución) .....	157
Figura 6. 14 Curvas del coste de la energía y del agua para una tubería fugando con demanda específica y características de fuga.....	158
Figura 6. 15 Esquema para la gestión del riesgo (adaptada de Holicky).....	161
Figura 6. 16 Estimación del conjunto difuso de los 5 grados lingüísticos.....	167
Figura 6. 17 Presión nodal con 85% de eficiencia en la red .....	170
Figura 6. 18 Presión nodal, estado actual de la red .....	170
Figura 6. 19 Caída de presión en la red, aplicando curva de bombeo original .....	171
Figura 6. 20 Acotamiento de las secciones de la acera en un tramo del sector centro.	173
Figura 6. 21 Estimación de cinco-tuplas de riesgo del conjunto difuso .....	176
Figura 6. 22 Planteamiento de la función objetivo y las restricciones .....	179
Figura 6. 23 Modelo de optimización.....	179
Figura 7. 1 Tiempo de fallo $T_i$ y tiempo de interfallos $X_i$ de un sistema reparable .....	185
Figura 7. 2 Datos de fallos disponibles típicos de un sistema de distribución.....	186
Figura 7. 3 Grafica de la función de la densidad de probabilidad.....	189
Figura 7. 4 Forma de bañera de la función de riesgo o FOM. ....	190
Figura 7. 5 Datos censurados (derecha) con entradas escalonadas .....	191
Figura 7. 6 Función de riesgo de la distribución Weibull $\lambda=0.1$ y $p$ variable.....	193
Figura 7. 7 Sectores del centro con el tipo de material homogéneo.....	209
Figura 7. 8 Esquema del tráfico pesado del sector centro.....	211
Figura 7. 9 Esquema de las canalizaciones próximas compartidas .....	212
Figura 7. 10 Grafico de probabilidad normal de .....	217
Figura 7. 11 Grafico P-P del $\ln \text{long}$ .....	217

Figura 7. 12 Grafico P-P de la edad.....	218
Figura 7. 13 lnH(t) para la edad.....	220
Figura 7. 14 lnH(t) para el material. ....	221
Figura 7. 15 lnH(t) para la variable longitud por estrato .....	221
Figura 7. 16 lnH(t) para la variable trafico. ....	222
Figura 7. 17 Grafica del número de fallos por año.....	224
Figura 7. 18 Número de fallos versus tuberías.....	227
Figura 7. 19 Función de riesgo de una tubería de fierro galvanizado de 40 años, con un relleno correcto, de un diámetro de 150 mm y 110 m. de longitud.....	248
Figura 7. 20 Betas para la covariable relleno .....	252
Figura 7. 21 Betas para la covariable material3 .....	252
Figura 7. 22 Betas para la covariable material2 .....	252
Figura 7. 23 Betas para la covariable longstrat2 .....	253
Figura 7. 24 Grafica Índice de beneficio sin estratificación, con el 100% de los individuos.....	260
Figura 7. 25 Grafica Índice de beneficio sin estratificación, con el 10% de los individuos.....	260
Figura 7. 26 Grafica Índice de beneficio con el estrato de las tuberías de FOGA, con el 100% de los individuos.....	262
Figura 7. 27 Grafica Índice de beneficio con el estrato de las tuberías de FOGA, con el 10% de los individuos.....	262
Figura 7. 28 Grafica Índice de beneficio con el estrato de las tuberías de Asbesto cemento y polietileno, con el 100% de los individuos .....	264
Figura 7. 29 Grafica Índice de beneficio con el estrato de las tuberías de Asbesto cemento y polietileno, con el 10% de los individuos .....	264
Figura 7. 30 Funciones del índice de riesgo de dos tuberías no modelado por un modelo de riesgo proporcional; la tubería C (constante) y la tubería D (incrementándose).....	266

---

Figura 7. 31 Funciones del índice de riesgo de un grupo de tuberías, modelado por un modelo de riesgo proporcional; con ningún cambio en los factores de riesgo. ....	267
Figura 7. 32 Funciones del índice de riesgo de un grupo de tuberías, modelado por un modelo de riesgo proporcional; una tubería experimenta una rotura. ....	268
Figura 7. 33 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 100% de todos los individuos. ....	270
Figura 7. 34 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 10% de todos los individuos. ....	271
Figura 7. 35 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 100% de todos los individuos. ....	271
Figura 7. 36 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 10% de todos los individuos. ....	272
Figura 7. 37 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 100% de todos los individuos. ....	272
Figura 7. 38 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 10% de todos los individuos. ....	273
Figura 7. 39 Diagrama de flujo del proceso de la reparación de roturas y generación de datos. ....	282
Figura 7. 40 Forma para la recolección de datos (pagina 1) .....	284
Figura 7. 41 Forma para la recolección de datos (pagina 2) .....	285
Figura 7. 42 Unifilar de la aplicación del modelo de vulnerabilidad .....	293
Figura 7. 43 Unifilar de la aplicación del modelo de vulnerabilidad .....	295
Figura 7. 44 Unifilar de la aplicación del modelo de IECF. ....	296
Figura 7. 45 Unifilar de la aplicación del modelo de IECF. ....	297



---

---

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 La gestión de la infraestructura adaptada a la renovación de las redes de agua potable (Alonso <i>et al</i> 2007).....	25
Tabla 3. 1 Principales características de los sistemas de agua.....	41
Tabla 3. 2 Datos brutos del sector agua.....	42
Tabla 3. 3 Distintos tipos de tuberías.....	44
Tabla 3. 4 La curva de consumo o curva de modulación.....	46
Tabla 4. 1 Factores de influencia en el índice de fallos de roturas (adaptado de Rostum 2000). .....	64
Tabla 4. 2 Factores de influencia en el índice de fallos de roturas (adaptado de Stone <i>et al.</i> , para EPA 2002) .....	65
Tabla 4. 3 Clasificación de factores tomada de Stephens y Jackson (2003).....	66
Tabla 4. 4 Factores de influencia considerados en cada uno de los modelos (Leng y Pratti, 2002).....	67
Tabla 5. 1 Número de acometidas .....	92
Tabla 5. 2 Coberturas de contadores.....	93
Tabla 5. 3 Cobertura de tarifas .....	94
Tabla 5. 4 Número de tuberías de los sectores de la red.....	96
Tabla 5. 5 Longitud de las tuberías de los sectores de la red .....	97
Tabla 5. 6 Material y eficiencia de las tuberías de los sectores de la red .....	97
Tabla 5. 7 Datos de los volúmenes del sector .....	100
Tabla 5. 8 Demanda horaria en nodos .....	101
Tabla 5. 9 Calculo del caudal de fugas .....	103
Tabla 5. 10 Calculo de los coeficientes de los emisores.....	105
Tabla 5. 11 Resultado del modelo aplicando los coeficientes de los emisores.....	106
Tabla 5. 12 Resultado de la valoración de la edad y periodo de instalación .....	112

Tabla 5. 13	Número de roturas por tipo de tubería.....	113
Tabla 5. 14	Puntuación de cada tubería en función del número de roturas / km. año..	114
Tabla 5. 15	Porcentaje de reducción del diámetro .....	115
Tabla 5. 16	Puntuación de la capacidad hidráulica .....	116
Tabla 5. 17	Valores de los índices de deficiencia en los nodos .....	117
Tabla 5. 18	Valores de los índices de impacto del caudal fugado.....	119
Tabla 5. 19	Índices y coeficientes de roturas .....	120
Tabla 5. 20	Costes de sustitución para los diversos diámetros .....	122
Tabla 5. 21	Costes de reparación para los diversos diámetros.....	122
Tabla 5. 22	Puntuación para los tiempos de renovación.....	123
Tabla 5. 23	Tipo y número de usuarios mayores por sector de análisis .....	124
Tabla 5. 24	Concentrado y puntuación del resultado del cierre de las tuberías .....	125
Tabla 5. 25	Puntuación final .....	126
Tabla 5. 26	Puntuación final de las densidades del trafico/edificios.....	127
Tabla 5. 27	Puntuación final .....	128
Tabla 5. 28	Concentrado final de valores y la suma aritmética .....	128
Tabla 6. 1	Grupo de tuberías y valores de los factores de influencia .....	134
Tabla 6. 2	Resultado de la puntuación sobre 100.....	141
Tabla 6. 3	Valores del análisis de sensibilidad.....	142
Tabla 6. 4	Matriz de valores de las sumas ponderadas.....	142
Tabla 6. 5	Escalas cualitativas de la probabilidad y consecuencia de riesgo de fallo ..	166
Tabla 6. 6	Definiciones lingüísticas de los grados usando números difusos triangulares para riesgo .....	167
Tabla 6. 7	Obtención de los valores del riesgo difuso .....	168
Tabla 6. 8	Concentrado de valores de los factores de influencia .....	169
Tabla 6. 9	Factor de coste, longitudes totales y coste total.....	169

Tabla 6. 10 Coste diario de la energía para los diferentes escenarios planteados.....	171
Tabla 6. 11 Caudales diarios para los tres escenarios planteados .....	172
Tabla 6. 12 Escala cualitativa de las consecuencias de riesgo .....	173
Tabla 6. 13 Resultados de la clasificación de las consecuencias de riesgo .....	174
Tabla 6. 14 Concentrado del cálculo de la probabilidad de fallo .....	175
Tabla 6. 15 Escala cualitativa de la probabilidad de riesgo .....	175
Tabla 6. 16 Clasificación de la probabilidad de fallo .....	175
Tabla 6. 17 Resultados de los números difusos triangulares. ....	176
Tabla 6. 18 Estructura de la obtención del riesgo difuso.....	177
Tabla 6. 19 Resultados del cálculo del coste de la consecuencia de fallo .....	177
Tabla 6. 20 Resultado y calculo de los beneficio al rehabilitar las tuberías .....	180
Tabla 6. 21 Concentrado de los factores, costes y beneficios totales para la optimización. ....	181
Tabla 6. 22 Resultados de la longitud óptima para cada grupo de tubería .....	181
Tabla 7. 1 Parámetros de regresión de los factores de riesgo significantes, para los modelos estratificados de CPHM y WPHM en LED-Bordeaux, CEB y Bas-Rhin .....	200
Tabla 7. 2 Parámetros de regresión para un modelo WPHM en Lausanne .....	201
Tabla 7. 3 Parámetros de regresión para un modelo WPHM en Charente-Maritime... ..	201
Tabla 7. 4 Resumen de los estudios de investigación (Adaptado de Vanrenterghem – Raven, 2003). ....	203
Tabla 7. 5 Base de datos de 59 tuberías estadísticas del total de 1685, incluye roturas, variables de sobrevivencia y de censura (time; censor) entre otras, respectivamente. ....	208
Tabla 7. 6 Calculo de la aproximación de S(t) de Kaplan-Meier.....	220
Tabla 7. 7 Descripción estadística de las tuberías. ....	222
Tabla 7. 8 Descripción estadística de las tuberías, variables específicas del entorno. .	223
Tabla 7. 9 Tiempo promedio observado entre roturas dependiendo del número de roturas. ....	225



---

Tabla 7. 10 Número de tuberías de la misma categoría que se rompen, basado en el material y el número de roturas.....	226
Tabla 7. 11 Descripción estadística de las tuberías .....	228
Tabla 7. 12 Descripción estadística de las tuberías por material y edad .....	230
Tabla 7. 13 Significancia estadística de cada variable con un PHM de Cox, para la población total.....	233
Tabla 7. 14 Resumen de la selección de Variables de un modelo de riesgo proporcional de Cox.....	244
Tabla 7. 15 Resultados de la comprobación del supuesto de riesgo proporcional.....	253
Tabla 7. 16 Tabla Índice de beneficio todos los individuos sin estratificar.....	255
Tabla 7. 17 Caso 1 para el índice de beneficio, con el número de fallos igualados.....	256
Tabla 7. 18 Caso 2 para el índice de beneficio, con el número de fallos igualados.....	256
Tabla 7. 19 Índice de beneficio todos los individuos sin estratificar, sin modificar. ...	257
Tabla 7. 20 Caso 1 para el índice de beneficio modificado, con el número de fallos igualados .....	258
Tabla 7. 21 Caso 2 para el índice de beneficio modificado, con el número de fallos igualados .....	258
Tabla 7. 22 Índice de beneficio todos los individuos sin estratificar, modificada. ....	259
Tabla 7. 23 Índice de beneficio para el estrato de las tuberías de FOGA.....	261
Tabla 7. 24 Índice de beneficio para el estrato de las tuberías de asbesto cemento y polietileno.....	263
Tabla 7. 25 Estrato para todos los individuos .....	277
Tabla 7. 26 Estrato Fierro galvanizado .....	278
Tabla 7. 27 Estrato tuberías de polietileno y hierro galvanizado .....	279
Tabla 7. 28 Recomendaciones para la recolección de datos .....	288
Tabla 7. 29 Rango mostrado con el modelo de evaluación .....	294
Tabla 7. 30 Rango para la evaluación de los factores de riesgo.....	295

---

---

Tabla 7. 31 Priorización en base al número de fallos esperados.....	296
Tabla 7. 32 Resultado del modelo integral, para la ayuda en la toma de decisiones ...	297

