

Contenido

<i>Agradecimientos</i>	<i>ii</i>
<i>Resumen</i>	<i>iii</i>
<i>Resum</i>	<i>iv</i>
<i>Abstract</i>	<i>v</i>
CAPÍTULO 1. Introducción	1
1.1. <i>Introducción</i>	1
1.2. <i>Justificación y objetivos</i>	4
1.2.1. <i>Objetivo general</i>	4
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	4
1.3. <i>Estructura del documento</i>	5
CAPÍTULO 2. Problemática de los sistemas con suministro intermitente	7
2.1. <i>Introducción</i>	7
2.2. <i>Sistemas con suministro intermitente</i>	8
2.2.1. <i>Inconvenientes de los sistemas con suministro intermitente</i>	9
2.2.2. <i>Ventajas de los sistemas con suministro intermitente</i>	13
2.3. <i>Clasificación de los sistemas con suministro intermitente</i>	14
2.3.1. <i>Categorización de la escasez de agua</i>	14
2.3.1.1. <i>Tipo 1: Escasez debida a una mala gestión</i>	14
2.3.1.2. <i>Tipo 2: La escasez económica</i>	15
2.3.1.3. <i>Tipo 3: La escasez absoluta</i>	15
2.3.2. <i>Categorización según el origen de los problemas</i>	15
2.3.2.1. <i>Problemas Tipo A:</i>	15
2.3.2.2. <i>Problemas Tipo B:</i>	16
2.3.3. <i>Matriz de clasificación</i>	16
2.4. <i>Demanda</i>	16
2.4.1. <i>Gestión de la demanda</i>	17
2.4.2. <i>La demanda en suministro continuo y en intermitente</i>	18
2.5. <i>Patrón de consumo</i>	19
2.5.1. <i>Patrón de consumo en suministro intermitente</i>	20
2.6. <i>Factor punta</i>	23
2.6.1. <i>Factor punta en suministro intermitente</i>	24
2.7. <i>Características hidráulicas de sistemas de suministro intermitente</i>	25
2.7.1. <i>Equidad en el suministro</i>	25
2.7.2. <i>Demanda dependiente de la presión</i>	26
2.7.3. <i>Presencia de aire en las tuberías con suministro intermitente</i>	28
2.8. <i>Modelización y simulación</i>	28
2.8.1. <i>Modelos de análisis estático</i>	29
2.8.2. <i>Modelos de análisis dinámico</i>	29
2.8.2.1. <i>Modelos no inerciales</i>	29
2.8.2.2. <i>Modelos inerciales</i>	30
2.8.3. <i>El proceso de modelización</i>	30
2.8.4. <i>Calibración del modelo</i>	32
2.8.5. <i>Simulación y modelización en sistemas con suministro intermitente</i>	32
2.9. <i>Pérdidas de agua en el sistema de abastecimiento</i>	35
2.9.1. <i>Pérdidas de agua en la red de distribución</i>	35
2.9.2. <i>Pérdidas reales</i>	36

2.9.3. Pérdidas aparentes.....	39
2.9.4. Pérdidas en sistemas con suministro intermitente.....	39
2.9.5. Métodos para estimar las fugas en sistemas con suministro intermitente.....	40
2.9.5.1. Método de cisternas móviles.....	40
2.9.5.2. Método de cierre de grifos.....	41
2.9.6. Hidráulica de las pérdidas reales.....	41
2.9.7. Gestión de las pérdidas reales.....	42
2.9.7.1. SRELL, short-run economic leakage level.....	43
2.9.7.2. Gestión de presión.....	46
CAPÍTULO 3. Capacidad de la red de suministro y la presencia de nudos desfavorables	49
3.1. Introducción.....	49
3.2. Capacidad de la red de suministro.....	49
3.3. Curva característica del sistema.....	50
3.4. Curva de consigna.....	52
3.4.1. Características de la curva de consigna.....	55
3.5. Caudal máximo teórico.....	60
3.6. Capacidad de la red con más de una fuente de suministro.....	65
3.7. Caudal máximo requerido en suministro continuo.....	67
3.8. Caudal máximo requerido en suministro intermitente.....	67
3.9. Nudos favorables y desfavorables en una red.....	68
3.10. La capacidad de la red y su relación con el suministro intermitente.....	79
CAPÍTULO 4. Medidas de mejora a corto plazo y transición del sistema con suministro intermitente a suministro continuo.....	83
4.1. Introducción.....	83
4.2. Acciones a corto plazo.....	84
4.2.1. Sectorización.....	84
4.2.2. Gestión de horarios.....	84
4.3. Acciones a largo plazo.....	85
4.4. Transición de sistema con suministro intermitente a suministro continuo.....	86
4.4.1. Transición directa y gradual.....	86
4.5. Propuesta para la transición a suministro continuo.....	89
4.5.1. Diagnóstico del sistema.....	91
4.5.2. Ampliación de la capacidad del sistema.....	92
4.5.3. Equidad en el suministro de agua.....	92
4.5.4. Transición a suministro continuo.....	93
4.5.5. Reducción de pérdidas de agua.....	93
4.6. Opinión de los expertos y su inclusión en la toma de decisiones.....	93
4.6.1. Decisión multicriterio.....	94
4.6.1.1. Variables explicativas.....	94
4.6.1.2. Normalización de variables.....	95
4.6.2. Proceso Analítico Jerárquico (AHP).....	95
4.6.2.1. Consistencia de la matriz pareada.....	97
CAPÍTULO 5. Diagnóstico básico de sistemas con suministro intermitente.....	101
5.1. Introducción.....	101
5.1.1. Condiciones para ejecutar medidas a corto plazo.....	101
5.1.2. Condiciones para ejecutar medidas a largo plazo.....	102
5.2. Diagnostico general del área de estudio.....	102
5.3. Recolección de información.....	102

5.3.1. Información cuantitativa	102
5.3.1.1. Base de Datos de Clientes	103
5.3.1.2. Base de Datos de la Red	104
5.3.2. Información cualitativa.....	104
5.4. Balance hídrico	104
5.4.1. Volumen de ingreso al sistema	106
5.4.2. Consumo autorizado	106
5.4.3. Agua facturada.....	107
5.4.4. Agua no facturada	107
5.4.5. Pérdidas de agua	107
5.5. Volumen de ingreso al sistema	107
5.5.1. Demanda per cápita.....	108
5.5.2. Porcentaje de fugas en suministro intermitente	108
5.6. Volumen consumido en la red.....	109
5.6.1. Reparto del volumen no facturado en cada sector.....	109
5.6.1.1. Corrección de la demanda mediante el porcentaje de pérdidas	109
5.6.1.2. Las fugas como consumos dependientes de la presión	109
5.6.1.3. Asignación de fugas como caudal medio constante.....	110
5.6.2. Caudal medio del periodo de suministro.....	110
5.6.3. Horario de suministro	112
5.6.4. Curva de suministro	112
5.6.5. Evaluación de la curva de suministro	112
5.7. Volumen de regulación de depósitos	113
5.8. Valores ponderados de presión y horas de suministro	113
5.9. Categorización del sistema con suministro intermitente	114
5.9.1. Escasez física	114
5.9.2. Escasez económica	115
5.9.3. Escasez por mala gestión	115
CAPÍTULO 6. Sectorización en sistemas con suministro intermitente.....	117
6.1. Introducción	117
6.2. Sectorización	118
6.2.1. Diseño de DMA.....	121
6.2.2. Sectorización en sistemas con suministro intermitente.....	122
6.3. Tiempo o periodo de suministro	123
6.4. Teoría de grafos	124
6.4.1. Matriz de adyacencia	124
6.4.2. Camino más corto entre dos vértices	125
6.4.3. Grafo ponderado.....	125
6.4.4. Algoritmo de Dijkstra	125
6.4.5. Vecindad (neighborhood).....	127
6.5. Análisis Clúster.....	127
6.5.1. Medidas de distancia	128
6.5.2. Centroide	129
6.6. Equidad del suministro.....	129
6.7. Evaluación de sectores en suministro intermitente.....	130
6.7.1. Evaluación de la capacidad del sector.....	131
6.7.1.1. Modificación del tiempo de suministro	134
6.7.1.2. Ampliación de la capacidad del sector.....	135
6.7.1.3. División del sector	135
6.7.2. Evaluación de la Uniformidad en el suministro	136

6.7.2.1. Modificación del tiempo de suministro	137
6.7.2.2. Ampliación de la capacidad del sector	138
6.7.2.3. División del sector	138
6.8. Proceso de sectorización de redes con suministro intermitente	138
6.8.1. Red o sector inicial.....	141
6.8.2. Identificación del nudo crítico	142
6.8.3. Identificación del camino más corto.....	143
6.8.4. Identificación del nudo de mayor similitud	144
6.8.4.1. Determinación del peso de las variables.....	148
6.8.5. Apertura de tuberías tras la selección del nudo.....	148
6.8.6. Tiempo de suministro del sector.....	149
6.8.7. Criterio de equidad en la configuración del sector	150
CAPÍTULO 7. Gestión de horarios en sistemas con suministro intermitente	153
7.1. Introducción	153
7.2. Optimización	154
7.2.1. Algoritmos de optimización.....	155
7.2.2. Programación lineal	156
7.2.2.1. Simplex	157
7.2.3. Programación lineal con variables enteras	157
7.2.3.1. Algoritmo Branch & Cut	157
7.3. Matriz circulante.....	158
7.4. Descripción general de la metodología	159
7.5. Bloques de suministro.....	160
7.6. Criterios para el cambio de horario de suministro.....	160
7.6.1. Cuantificación de variables.....	161
7.6.1.1. Cantidad de usuarios del sector.....	162
7.6.1.2. Presión de servicio	162
7.6.1.3. Horas de suministro.....	163
7.6.1.4. Facilidad en la operación del sector.....	163
7.6.1.5. Volumen de ingreso al depósito.....	164
7.6.1.6. Ponderación de criterios	164
7.6.1.7. Cálculo de factores por cada criterio.....	165
7.7. Optimización del horario de suministro.....	165
7.7.1. Problema de optimización	168
7.8. Verificación hidráulica	169
7.9. Elección del escenario óptimo.....	169
CAPÍTULO 8. Análisis de la ampliación de la capacidad de la red y el incremento de fugas tras la transición a suministro continuo	171
8.1. Introducción	171
8.2. Rehabilitación	173
8.3. Ampliación de la capacidad de la red en sistemas con suministro intermitente	175
8.4. Caudal máximo teórico	176
8.5. Caudal máximo requerido	179
8.6. Proceso de ampliación de la capacidad de la red.....	179
8.6.1. Costes implicados en la ampliación de la capacidad de la red	183
8.6.2. Características del modelo matemático de la red	184
8.6.3. Selección del tramo a modificar	184
8.7. Identificación de cuellos de botella en la red.....	186
8.8. Análisis de las pérdidas reales tras la transición a suministro continuo	186

8.8.1. Relación entre volúmenes de fugas en suministro intermitente y continuo	187
8.8.2. Relación entre porcentajes de fugas en suministro intermitente y continuo	193
8.8.3. El porcentaje de fugas en suministro continuo como criterio de diseño	196
8.8.3.1. Pérdidas de agua en sistemas con suministro continuo.....	197
8.8.4. Reducción de las pérdidas reales en el proceso de transición.....	198
8.8.5. Gestión de presión en los sectores tras el proceso de transición.....	202
CAPÍTULO 9. Transición gradual a suministro continuo.....	204
9.1. Introducción	204
9.2. Descripción del proceso de selección de sectores	205
9.2.1. Transición gradual con la reducción del caudal pico.....	207
9.2.2. Transición gradual con el crecimiento del caudal pico.....	207
9.3. Algoritmos evolutivos	208
9.4. Algoritmos genéticos.....	208
9.4.1. Cromosoma	209
9.4.1.1. Codificación.....	210
9.4.2. Operadores genéticos.....	210
9.4.2.1. Cruce.....	210
9.4.2.2. Mutación.....	211
9.4.2.3. Selección.....	211
9.5. Evolver.....	211
9.6. Criterios para la selección de sectores.....	212
9.6.1. Cuantificación de variables.....	212
9.6.1.1. Cantidad usuarios del sector	213
9.6.1.2. Presión de servicio	213
9.6.1.3. Distancia a la fuente de suministro	214
9.6.1.4. Equidad de suministro del sector.....	214
9.6.1.5. Dificultad de operación del sector	216
9.6.2. Topología de la red	216
9.6.3. Presión calculada en cada etapa de mejora	220
9.6.4. Ponderación de criterios.....	221
9.6.5. Cálculo de factores por cada criterio	221
9.7. Cambio de patrón de suministro.....	222
9.8. Optimización de la selección de sectores que cambian a suministro continuo	223
9.8.1. Caudal pico en suministro intermitente mayor al caudal pico en suministro continuo.....	225
9.8.1.1. Problema de optimización.....	225
9.8.2. Caudal pico en suministro intermitente menor al caudal pico en suministro continuo	226
9.8.2.1. Problema de optimización.....	227
CAPÍTULO 10. Caso de estudio: zona sur de la ciudad de Oruro, Bolivia	229
10.1. Introducción	229
10.2. Sectorización de una red con suministro intermitente.....	230
10.2.1. Evaluación preliminar de la red.	230
10.2.2. Variables para el proceso de clustering.....	232
10.2.3. Determinación del peso de las variables	235
10.2.4. Configuración del primer sector.....	236
10.2.5. Configuración del segundo sector	241
10.3. Diagnóstico del subsistema de la zona sur de Oruro.....	245
10.3.1. Descripción del área de estudio	246
10.3.1.1. Localización geográfica	246
10.3.1.2. Clima	247

10.3.1.3. Topografía	248
10.3.1.4. Población.....	248
10.3.1.5. Características socioeconómicas.....	249
10.3.2. Características del abastecimiento de agua	250
10.3.2.1. SeLA – Oruro	254
10.3.2.2. Características de la conexión domiciliaria	254
10.3.2.3. Descripción del subsistema de la zona sur	256
10.3.3. Balance hídrico	257
10.3.4. Demanda per cápita.....	259
10.3.5. Porcentaje de fugas en suministro intermitente	259
10.3.6. Volumen de ingreso al sistema.....	260
10.3.7. Volumen consumido en la red	261
10.3.7.1. Horarios de suministro.....	264
10.3.7.2. Curva de suministro.....	264
10.3.8. Volumen de regulación depósito Agua de Castilla.....	266
10.3.9. Valores ponderados de presión y horas de suministro	267
10.3.10. Categorización del sistema con suministro intermitente.....	269
10.4. Evaluación del origen del suministro intermitente, cuando las ampliaciones reducen la capacidad de la red	269
10.5. Gestión de horarios de suministro.....	276
10.5.1. Criterios para el proceso de optimización	276
10.5.2. Ponderación de criterios.....	279
10.5.3. Cálculo de los factores por criterio para la optimización	280
10.5.4. Elección del sector que modificará su horario	281
10.5.5. Verificación hidráulica	286
10.6. Ampliación de la capacidad de la red.....	288
10.6.1. Información disponible del suministro intermitente y presupuesto	288
10.6.2. Costes unitarios para sustitución de tramos	289
10.6.3. Cálculo de la presión en suministro continuo.....	290
10.6.4. Identificación de cuellos de botella en la red	291
10.6.5. Etapas para la ampliación de la capacidad de la red.....	292
10.7. Selección de los sectores que tendrán suministro continuo tras cada etapa de ampliación.....	297
10.7.1. Evaluación de la equidad en los sectores.....	297
10.7.2. Dificultad de operación del sector.....	303
10.7.3. Cantidad de usuarios del sector.....	304
10.7.4. Presión de servicio.....	304
10.7.5. Distancia a la fuente de suministro.....	305
10.7.6. Topología de la red	305
10.7.7. Ponderación de criterios.....	307
10.7.8. Cálculo de factores por cada criterio	308
10.7.9. Cambio de patrón de suministro.....	309
10.7.10. Selección de sectores en cada etapa de mejora	309
10.8. Gestión de presión en suministro continuo.....	313
CAPÍTULO 11. Conclusiones y desarrollos futuros.....	315
11.1. Introducción	315
11.2. Aportaciones de carácter general.....	315
11.3. Aportaciones específicas de la tesis	316
11.4. Desarrollos futuros.....	319
Referencias	321