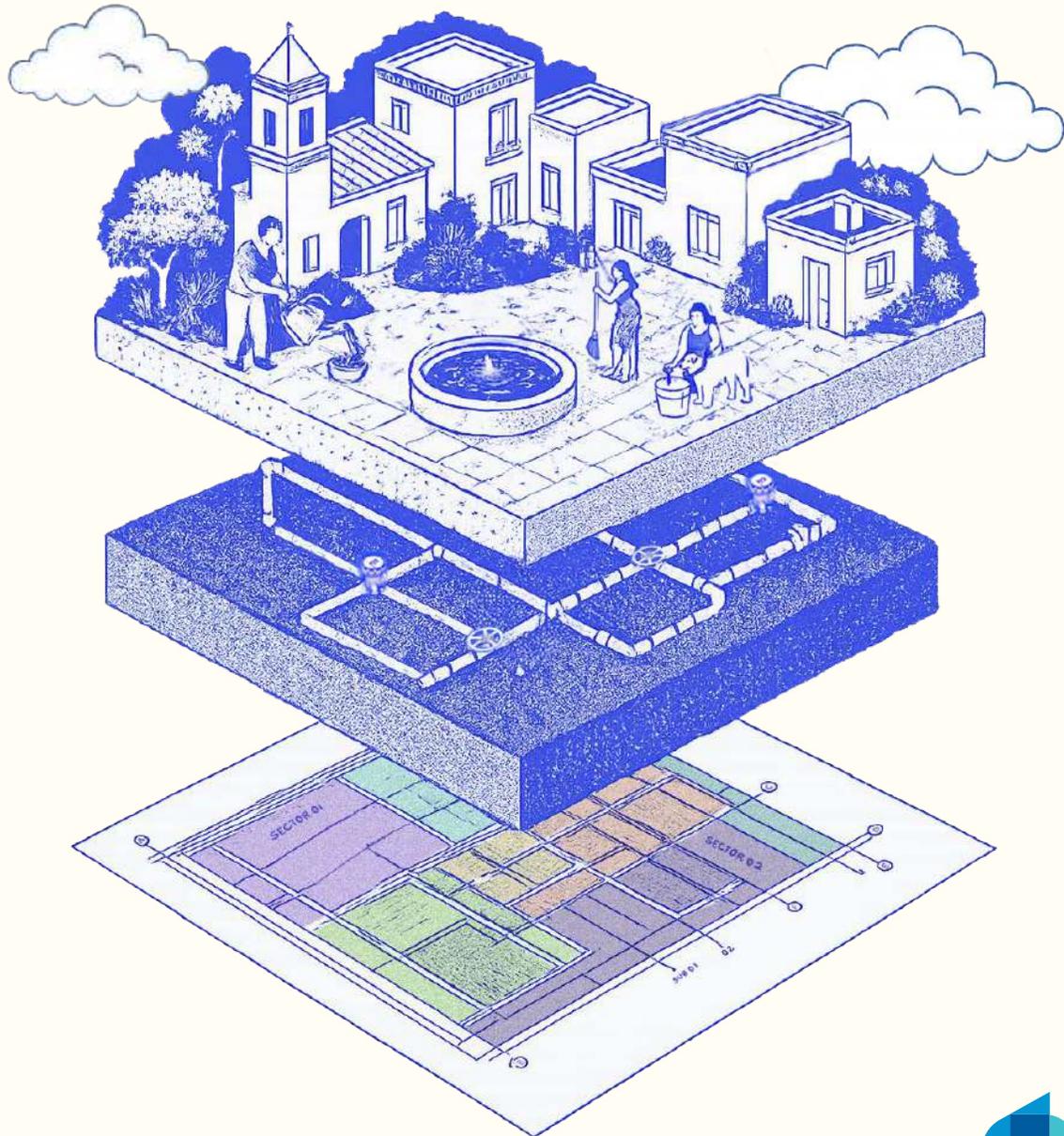


SECTORIZACIÓN DE REDES DE AGUA POTABLE



Leonel H. Ochoa Alejo



SECTORIZACIÓN DE REDES DE AGUA POTABLE

Leonel H. Ochoa Alejo

Coordinación editorial:

Leonel H. Ochoa Alejo
Asociación Nacional de Entidades de Agua y Saneamiento de México A.C.

Diseño editorial: Pablo Ochoa Barrios

Revisión y paginación: Eduardo Manuel Pereda Padilla

Diseño de portada: ANEAS de México A.C.

D.R.© Leonel H. Ochoa Alejo
Cuernavaca, Morelos
MÉXICO

D.R.© Asociación Nacional de Entidades de Agua y Saneamiento de México A.C.
Periférico Sur #3332, oficina 604, Col. Jardines del Pedregal, alcaldía Álvaro
Obregón, C.P. 01900, Ciudad de México.
MÉXICO

Fecha:

Enero de 2025

ISBN: 978-607-96014-6-1

Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra, sin fines de lucro y citando la fuente. Esta publicación forma parte de los productos generados por el Dr. Leonel H. Ochoa Alejo.

Impreso en México-Printed in México

Dedicado a Silvana

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la participación de los organismos operadores de sistemas de agua potable que han decidido realizar la sectorización de su red de distribución, ya que ha sido determinante en el desarrollo del proceso, lo cual se expresa y se otorga el reconocimiento por su apoyo técnico y económico.

De igual manera, se reconoce al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), por su incansable labor en el desarrollo tecnológico de la sectorización de redes de agua potable; al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), por su aportación a la divulgación de los conceptos respectivos; y a la Asociación Nacional de Entidades de Agua y Saneamiento de México (ANEAS), por su gestión indiscutible que siempre ha impulsado en el fortalecimiento de las capacidades de los organismos operadores de sistemas de agua potable y saneamiento.

Se agradecen todas las aportaciones técnicas para el desarrollo de la sectorización de redes de agua aquí expuesta, que hicieron los ingenieros: Manuel Alejandro Quiñones Perera, Arturo Estrada Ramírez, Marco Antonio Pozos Leal, José Carlos González Pascual, José Luis Reyes Medel, Víctor Hugo Ochoa Alejo, Sergio Enríquez Zapata, José Alberto Arrieta Ocampo, Amado Rodríguez Venosa, Luis Felipe Hernández Barrios.

A Eduardo Manuel Pereda Padilla por su trabajo en la administración de los proyectos realizados y a mi hijo, el biólogo Daniel Ochoa Gutiérrez, quien aportó el análisis sobre la pureza de agua en este libro.

Hago una distinción de los siguientes profesores, colegas, alumnos y amigos, que fueron clave en el transcurso de los años para mi desarrollo profesional y que, de alguna forma, influyeron positivamente en mi vida y hacia la preparación de esta obra: Dr. Felipe I. Arreguin Cortés, Ing. Antonio Fernández Esparza, M.I. Antonio Capella Vizcaíno, M.I. Víctor Javier Bourguet Ortiz, Dr. Velitchko Georgiev Tzatchkov, Dr. Enrique Cabrera Marcet, Dr. Rafael Pérez García, Ing. Ramón Aguirre Díaz, M.I. José Ángel Ruíz Aparicio, M.I. Arturo Jiménez Ramón, Ing. Roberto Olivares, M.I. Manuel Rodríguez Varela y M.I. Salvador Navarro Barraza.

Expreso mi agradecimiento al Ing. Arturo Pedraza Martínez, director del programa *Watergy en México*, por su esfuerzo para establecer y preservar la misión en México.

También, se hace un reconocimiento muy especial al Ing. Raúl Abraham Sánchez Sánchez y al Lic. Armando Mendoza Reyes, por su amistad, buenas ideas y datos que me proporcionaron sobre la medición de agua potable y el apoyo incondicional que siempre me han brindado.

Agradezco profundamente al Ing. José Lara Lona y a la Mtra. Patricia Hernandez Martínez, por su apoyo incondicional en la elaboración y promoción de este libro y porque siempre me han brindado oportunidades en la difusión y enseñanza de la hidráulica de sistemas de agua potable.

Quiero, finalmente, expresar mi admiración y cariño a mis hijos: Mariana, Daniel, Miguel y Pablo, porque los quiero y me animan en la vida; a mi familia con respeto; a mis amigos por su lealtad y a mi esposa Silvana, a quien amo y reconforta mi ser.

CONTENIDO

PREFACIO	1
INTRODUCCIÓN	3
1. EL SISTEMA DE AGUA POTABLE	5
1.1 PROPÓSITO, COMPONENTES Y REQUISITOS	7
1.2 LA DISPONIBILIDAD Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA.....	9
1.3 CONSERVACIÓN DE LA PURIFICACIÓN DEL AGUA	11
1.3.1 Contaminación del agua en la red por microorganismos	13
1.3.1.1 Bacterias	13
1.3.1.2 Protozoarios	14
1.3.1.3 Algas	15
1.3.1.4 Hongos	15
1.3.1.5 Animales	16
1.3.1.6 Virus	16
1.3.1.7 Biofilms	17
1.3.2 Contaminación del agua en la red por sustancias inorgánicas	18
1.3.3 Medidas para conservar la pureza del agua	19
1.4 AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA	21
1.5 REHABILITACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA	27
1.6 PREVENCIÓN DE RIESGOS ANTE EVENTOS NATURALES EXTREMOS	32
1.7 EL RETO DE LA INGENIERÍA DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA	35
1.8 ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA.....	35
1.9 LA SECTORIZACIÓN DE LA RED	37
1.10 PROCESO PARA IMPLEMENTAR LA SECTORIZACIÓN DE LA RED	40
BIBLIOGRAFÍA	42
REFERENCIAS	42
PROYECTOS DE REFERENCIA	42
LIGAS INTERNET	42
2. PLANEACIÓN	45
2.1 CONCEPTOS DE INGENIERÍA BÁSICA DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE	47
2.2 PERIODO DE DISEÑO Y VIDA ÚTIL DE LAS OBRAS	50
2.3 FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL SISTEMA	52
2.3.1 Inventario de la infraestructura.....	52
2.3.2 Revisión y actualización de planos.....	55
2.3.2.1 Exploración, ordenamiento digital y mejoramiento de la calidad de planos.....	55
2.3.2.2 Trabajos de campo en la actualización de planos.....	67
2.3.3 Análisis de la operación del sistema	70
2.4 POBLACIÓN EN EL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA	72
2.4.1 Comportamiento de la población	72
2.4.2 Proyección del tamaño de la población	79
2.4.3 Estimación de la distribución espacial de la población.....	87
2.5 LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA	92
2.5.1 Cuantificación del volumen de agua suministrada al sistema	92
2.5.2 Volumen de consumos de usuarios del sistema de agua potable	96
2.5.3 Consumo unitario	103

2.5.4	<i>Pérdidas de agua</i>	113
2.5.5	<i>Demanda de agua potable</i>	124
2.5.6	<i>Dotación y gasto medio diario</i>	130
2.5.6.1	Dotación de agua.....	130
2.5.6.2	Gasto Medio Diario.....	131
2.5.7	<i>Estrategias para equilibrar la oferta con la demanda de agua</i>	132
2.5.8	<i>Solución ante las variaciones temporales y espaciales del agua en el sistema de abastecimiento</i>	137
2.5.8.1	Variación temporal del agua.....	137
2.5.8.2	Variación espacial del agua.....	141
2.5.9	<i>Evaluación de caudales suministrados y demandados en zonas de la red</i>	141
2.5.9.1	Método de evaluación espacial de caudales en la red.....	141
2.5.9.2	Definición de áreas de influencia de operación y cálculo de su población.....	144
2.5.9.3	Estimación de caudales suministrados y demandados en cada área de influencia hidráulica de la red.....	146
2.5.9.4	Comparación entre el suministro y demanda de agua en cada zona de la red.....	148
2.6	ANTEPROYECTO DE SECTORIZACIÓN DE LA RED DE AGUA POTABLE	151
2.6.1	<i>Esquemas de trazo de sectores en redes de agua potable</i>	151
2.6.2	<i>Elementos clave para elaborar el anteproyecto de sectores en redes de agua potable</i> ...	154
2.6.3	<i>Desarrollo del anteproyecto de sectores en la red de agua potable</i>	158
2.6.4	<i>Casos de estudio de anteproyectos de sectores en redes de agua potable</i>	162
	BIBLIOGRAFÍA.....	173
	REFERENCIAS.....	173
	PROYECTOS DE REFERENCIA.....	174
	LIGAS INTERNET.....	174
3.	DISEÑO	176
3.1	CONCEPTOS DE DISEÑO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE	178
3.1.1	<i>Proceso general de diseño de sistemas de agua potable</i>	178
3.1.2	<i>Método de análisis hidráulico en el diseño de la sectorización de la red de agua potable</i> 179	
3.2	DISEÑO HIDRÁULICO DE LA SECTORIZACIÓN DE LA RED	184
3.2.1	<i>Conformación del modelo de simulación hidráulica de la red</i>	184
3.2.1.1	Teoría de la modelación de redes de agua potable.....	184
3.2.1.2	Software comercial para la modelación de redes de agua potable.....	189
3.2.1.3	Aplicación práctica de la modelación hidráulica en la sectorización de la red.....	193
3.2.1.4	Calibración del modelo de simulación hidráulica de la red.....	205
3.2.2	<i>Análisis y diseño hidráulico de la sectorización de la red</i>	206
3.2.2.1	Análisis y diseño hidráulico de la red secundaria de los sectores.....	207
3.2.2.2	Análisis y diseño hidráulico de la red primaria de los sectores.....	211
3.2.2.3	Análisis y diseño hidráulico en período extendido de la red primaria acoplada con la red secundaria de sectores.....	216
3.3	DISEÑO DE DISTRITOS HIDROMÉTRICOS	217
3.4	PLANOS CONSTRUCTIVOS, ESPECIFICACIONES, MEMORIA Y PRESUPUESTO DE PROYECTO	223
3.4.1	<i>Elaboración de planos constructivos de sectores y distritos hidrométricos</i>	223
3.4.2	<i>Cuantificación de obras a ejecutar en la sectorización de la red y presupuesto base</i>	237
3.5	EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO DE SECTORIZACIÓN	241
3.5.1	<i>Conceptos de la evaluación económica de la sectorización de redes de agua potable</i>	241

3.5.2	<i>Cálculo de los costos de la sectorización de la red</i>	244
3.5.3	<i>Cálculo de los beneficios económicos de la sectorización de la red</i>	249
3.5.4	<i>Cálculo del beneficio-costo de la implementación del proyecto de sectorización de la red de agua potable</i>	254
	BIBLIOGRAFÍA	258
	REFERENCIAS	258
	PROYECTOS DE REFERENCIA	258
4.	CONSTRUCCIÓN E INSTRUMENTACIÓN	260
4.1	CONCEPTOS DE CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE	262
4.2	VERIFICACIÓN DEL DISEÑO EN CAMPO Y PROGRAMACIÓN DE OBRAS A EJECUTAR	263
4.2.1	<i>Ubicación y levantamiento en campo de sitios de obra</i>	263
4.2.2	<i>Adecuaciones al diseño original resultantes de las inspecciones de campo</i>	265
4.2.3	<i>Programación de las actividades para la ejecución de obra</i>	268
4.3	EJECUCIÓN DE OBRA CIVIL	270
4.3.1	<i>Generalidades constructivas</i>	271
4.3.2	<i>Construcción de cajas e instalación de válvulas</i>	276
4.3.3	<i>Ejecución de cortes de tuberías</i>	279
4.3.4	<i>Instalación o sustitución de tuberías</i>	281
4.3.5	<i>Ejecución de reconexiones de tuberías</i>	284
4.4	INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPAMIENTO	286
4.4.1	<i>Instalación y operación de medidores de caudal y presión</i>	286
4.4.1.1	Medidores de caudal	287
4.4.1.2	Medidores de presión.....	298
4.4.2	<i>Instalación de válvulas de control automático</i>	299
	BIBLIOGRAFÍA	306
	REFERENCIAS	306
	PROYECTOS DE REFERENCIA	306
	LIGAS INTERNET	306
5.	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	308
5.1	FUNDAMENTOS DE LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE	310
5.1.1	<i>Conceptos generales</i>	310
5.1.2	<i>Finalidad y metas</i>	311
5.1.3	<i>Archivo de información base</i>	312
5.1.3.1	Registros	313
5.1.3.2	Planos.....	314
5.1.3.3	Estadísticas	315
5.1.3.4	Manual de operación y mantenimiento.....	318
5.1.4	<i>Requerimientos de equipamiento, recursos materiales y humanos</i>	319
5.1.4.1	Equipamiento y recursos materiales	319
5.1.4.2	Recursos humanos	322
5.2	PRUEBAS DE AISLAMIENTO Y PUESTA EN OPERACIÓN DE SECTORES.....	323
5.2.1	<i>Pruebas de aislamiento de sectores y distritos hidrométricos</i>	323
5.2.2	<i>Puesta en operación de los sectores de la red</i>	326
5.2.3	<i>Evaluación de eficiencia antes y después de acciones en sectores</i>	330
5.3	EVALUACIÓN DE EFICIENCIA HIDRÁULICA EN SECTORES	331

5.4	EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA VOLUMÉTRICA Y DEL NIVEL DE FUGAS EN SECTORES.....	336
5.5	EVALUACIÓN DE EFICIENCIA DE FACTURACIÓN EN SECTORES	351
5.6	MANTENIMIENTO CONTINUO DE SECTORES	358
5.6.1	<i>Mantenimiento de válvulas.....</i>	359
5.6.2	<i>Mantenimiento de medidores</i>	363
5.6.3	<i>Actualización de datos e información de la red en planos y modelo de simulación hidráulica</i>	365
	BIBLIOGRAFÍA	368
	REFERENCIAS	368
	PROYECTOS DE REFERENCIA.....	368
	LIGAS INTERNET.....	369
	<i>EPÍLOGO</i>	370
A.	<i>APÉNDICE</i>	374
A.1.	FUNDAMENTOS	375
A.2.	TEORÍA DE GRAFOS.....	376
A.3.	ALGORITMO DE SECTORIZACIÓN DE REDES DE AGUA POTABLE.....	379
	REFERENCIAS	387

FIGURAS

Figura 1-1. Componentes típicos de un sistema de abastecimiento de agua potable.	8
Figura 1-2. Algunas obras de infraestructura de los sistemas de abastecimiento de agua potable.....	8
Figura 1-3. Ciclo hidrológico del agua.	9
Figura 1-4. Ejemplos de fuentes de abastecimiento y obras de captación de una región.	10
Figura 1-5. Fuente de abastecimiento superficial (río) y obra de captación común en México (obra de toma).	10
Figura 1-6. Fuente de abastecimiento subterránea (acuífero) y obra de captación común en México (pozo profundo).	10
Figura 1-7. Bacteria Escherichia coli.....	14
Figura 1-8. Protozooario Giardia lamblia.	14
Figura 1-9. Alga Cyanobacterium.	15
Figura 1-10. Hongo chytridiomycetes.	15
Figura 1-11. Animales tipo Nematodos.....	16
Figura 1-12. Virus gastroenteritis.	17
Figura 1-13. Biofilm o biopelícula con la bacteria lengionella	17
Figura 1-14. Sistema Típico de Suministro y Consumo Energético en Sistemas de Agua Potable y Saneamiento.....	24
Figura 1-15. Regiones tarifarias y cargos de las tarifas por energía, CFE.	26
Figura 1-16. Tubería rehabilitada por desgaste interno.	28
Figura 1-17. Modelo económico de Walski para elegir el período óptimo de rehabilitación o renovación de tuberías.	29
Figura 1-18. Método de Pardo, Cabrera y Cobacho para elegir el período óptimo de rehabilitación o renovación de tuberías.	30
Figura 1-19. Clasificación de técnicas para rehabilitar y renovar tuberías sin hacer zanja.....	31
Figura 1-20. Tecnologías para rehabilitar y renovar tuberías sin hacer zanja.	31
Figura 1-21. Impactos de fenómenos naturales en sistemas de abastecimiento de agua potable.....	33
Figura 1-22. Procesos de un sistema de agua potable.	36
Figura 1-23. Esquema de funcionamiento de un distrito hidrométrico en una red.....	38
Figura 1-24. Sectorización de una red de distribución de agua potable.	39
Figura 1-25. Etapas de la sectorización de redes de agua potable.....	41
Figura 2-1. Cuadro sinóptico de actividades para la elaboración de la ingeniería básica de un sistema de abastecimiento de agua potable.	47
Figura 2-2. Ubicación de infraestructura de abastecimiento en imagen satelital.	54
Figura 2-3. Planimetría con y sin errores de escala.	56
Figura 2-4. Simbología de tuberías para dibujo de planos de redes de agua potable (Conagua).	57
Figura 2-5. Plano típico de la red de distribución de agua potable.....	57
Figura 2-6. Plano de la red de agua potable formado en mosaicos a escala 1:2000 y Plano de la red a escala 1:2000.	59
Figura 2-7. Simbología de piezas especiales para redes de agua potable (Conagua).....	60
Figura 2-8. Plano típico de cruceros de la red de agua potable.	61
Figura 2-9. Plano topográfico con detalle de curvas de nivel.....	62
Figura 2-10. Dibujos para los planos de fontanería de infraestructura.....	65
Figura 2-11. Planos hidráulicos típicos de obras del sistema de abastecimiento de agua potable.	66
Figura 2-12. Plano hidráulico del trazo de línea de conducción de agua potable.	67
Figura 2-13. Formato tipo de levantamiento de caja de válvula.....	68

Figura 2-14. Formato tipo del levantamiento de fontanería de infraestructura hidráulica de agua potable (tanque de regularización).....	69
Figura 2-15. Diagrama unifilar del funcionamiento hidráulico de un sistema de agua potable.....	70
Figura 2-16. Factores que influyen en el crecimiento de una población.....	72
Figura 2-17. Curva característica de crecimiento de una población dentro de un espacio y oportunidad limitados.....	73
Figura 2-18. Ajuste exponencial del crecimiento de la población del ejemplo.	75
Figura 2-19. Ajuste logístico del crecimiento de la población del ejemplo.....	79
Figura 2-20. Datos censales de población en una localidad mexicana, con registros históricos de largo plazo, del ejemplo.	80
Figura 2-21. Resultado de ajuste logarítmico y lineal de población de corto plazo y proyección, del ejemplo.....	82
Figura 2-22. Resultado de ajuste logístico de población de largo plazo y proyección, del ejemplo.	83
Figura 2-23. Ubicación de tomas domiciliarias domésticas de la ciudad # 2 en un sistema de información geográfica.	85
Figura 2-24. Datos de población observados en una zona de la ciudad de México, en el ejemplo.	87
Figura 2-25. Muestra de Ageb publicados por INEGI, con valores de población.	88
Figura 2-26. Vista en planta de los Ageb con valores de población, exportados a un SIG de una zona de la ciudad de México.	89
Figura 2-27. Zonas de operación de localidad del ejemplo.....	89
Figura 2-28. Ageb de la ciudad del ejemplo con el número de habitantes.	90
Figura 2-29. Zonas de operación empalmadas con los Ageb.....	90
Figura 2-30. Macromedidores comerciales fijos y portátiles para registrar el agua suministrada al sistema de agua potable.....	93
Figura 2-31. Captación con medidores fijos, funcionando continuamente.....	93
Figura 2-32. Instalación del medidor auditor portátil para prueba en campo de la exactitud de un macromedidor.....	94
Figura 2-33. Registro de volumen de agua suministrada con medidor portátil.	95
Figura 2-34. Clasificación del consumo de agua potable.....	96
Figura 2-35. Medidores fabricados para registro del volumen de consumo de agua potable fría.....	97
Figura 2-36. Banco de pruebas para medidores nuevos en laboratorio.	98
Figura 2-37. Registro de volúmenes medidos de consumo de agua doméstica.	98
Figura 2-38. Volúmenes medidos de consumo de agua No-doméstica.	99
Figura 2-39. Curva de probabilidad normal tipificada y valores de Zc.	100
Figura 2-40. Equipo para la prueba en campo con objeto de obtener los errores de exactitud en medidores instalados en tomas domiciliarias de usuarios.	100
Figura 2-41. Toma domiciliaria sin micromedidor para registro del volumen de consumo (cuota fija).	102
Figura 2-42. Porcentajes de clase socioeconómica del ejemplo.	111
Figura 2-43. Clasificación de las pérdidas de agua potable.	113
Figura 2-44. Situación de las pérdidas en la región.	114
Figura 2-45. Esquema de administración del agua de un sistema de abastecimiento de agua potable.	116
Figura 2-46. Balance hídrico o auditoría de agua, presentada por la AWWA – IWA y esquema del balance hídrico, basado en la técnica de la AWWA - IWA.....	117
Figura 2-47. Gráfica de datos y resultados de la demanda de agua total del ejemplo.	129
Figura 2-48. Escenario A: demanda MAYOR que el suministro de agua.	133
Figura 2-49. Escenario B: demanda IGUAL que el suministro de agua.....	133
Figura 2-50. Escenario C: demanda MENOR que el suministro de agua.....	134

Figura 2-51. Escenario A: demanda MAYOR que la oferta actual; proyección de la demanda de agua con y sin reducción de fugas.....	135
Figura 2-52. Escenario B: demanda IGUAL que la oferta actual; proyección de la demanda de agua manteniendo el nivel de fugas.	136
Figura 2-53. Escenario C: demanda MENOR que la oferta actual; proyección de la demanda de agua con y sin reducción de fugas.....	136
Figura 2-54. Curva típica de variación diaria del caudal de consumo de una población.	137
Figura 2-55. Curva típica de variación del caudal de consumo de una población.	137
Figura 2-56. Esquemas de sistemas de abastecimiento con distintas condiciones de gastos a utilizar en el planeación y diseño del sistema de agua potable.....	138
Figura 2-57. Curva de gastos medios diarios para calcular el coeficiente de variación diaria.....	139
Figura 2-58. Curva de gastos horarios en el día de máximo caudal medio diario, para calcular el coeficiente de variación horaria.....	140
Figura 2-59. Distribución espacial de caudales (en porcentaje) de demanda por la población de una ciudad ficticia; incluyen gastos de fugas.	142
Figura 2-60. Distribución espacial los caudales (en porcentaje) suministrados en una ciudad ficticia; OC= Obra de captación.	143
Figura 2-61. Resultado del balance de caudales en la red de agua potable de una ciudad ficticia.....	143
Figura 2-62. Ejemplo de delimitación de zonas de influencia de abastecimiento de agua en una ciudad.	145
Figura 2-63. Croquis tipo de caudales suministrados actualmente a las distintas zonas de influencia de la parte noroeste red de agua potable del ejemplo.....	147
Figura 2-64. Opciones de caudales máximos a suministrar para cubrir la demanda horaria de agua en una red de distribución de agua potable.	149
Figura 2-65. Esquema de red con trazo convencional mallado.....	151
Figura 2-66. Esquema de red con trazo en sectores tipo red primaria y bloques de tuberías secundarias.	152
Figura 2-67. Sectorización de la red del centro histórico de una ciudad de México; ejemplo de sectorización de red primaria con bloques de red secundaria.....	153
Figura 2-68. Esquema de red con trazo en sectores tipo redes primaria y secundaria integrada.	153
Figura 2-69. Sectorización de la red de una ciudad de México; ejemplo de sectorización de redes primaria y secundaria, integradas.	154
Figura 2-70. Conformación de los sectores de proyecto en la ciudad ficticia del ejemplo, para equilibrar caudales de suministro y demanda.	157
Figura 2-71. Ejemplo de curva típica de variación horaria de la demanda de agua en un sistema de agua potable.....	160
Figura 2-72. Vista general de la ubicación de las zonas N2, N3 y N4 del noroeste de la ciudad real del ejemplo.	163
Figura 2-73. Zonas de influencia actual e infraestructura hidráulica disponible en las zonas N2, N3 y N4 del noroeste de la ciudad real del ejemplo.....	164
Figura 2-74. Sectores de proyecto SH1, SH2 y SH3 del noroeste de la ciudad real del ejemplo.	164
Figura 2-75. Esquema de abastecimiento de agua potable y zonas de influencia de operación hidráulica en una ciudad.	165
Figura 2-76. Esquema de sectores SH que resultó de las modificaciones a las zonas de influencia de operación hidráulica actual y el equilibrio de caudales, en la ciudad real del caso 2.....	166
Figura 2-77. Subsectores de proyecto de la ciudad del caso 2.	167
Figura 2-78. Red primaria de distribución de agua actual en la ciudad del caso de estudio 3.	168
Figura 2-79. Sectores de proyecto para la redistribución de en la ciudad del caso de estudio 3.....	169

Figura 2-80. Proyecto de conducciones para suministrar agua a los sectores de redistribución de agua potable en la ciudad del caso de estudio 3.	169
Figura 2-81. Zonas de influencia en una ciudad con pozos de suministro de agua potable dispersos en todo el sistema.	170
Figura 2-82. Plan de sectores en la red de agua potable de una ciudad con pozos dispersos, caso 4. ..	171
Figura 2-83. Detalle del plan de en la red de agua potable de una ciudad con pozos dispersos, caso 4, donde se nota que se han equilibrado los caudales suministrados con las demandas de agua.....	172
Figura 3-1. Modelo de simulación hidráulica de la red secundaria de sectores del ejemplo y adecuaciones de diseño para su buen funcionamiento hidráulico interno.	181
Figura 3-2. Ejemplo de la conformación del modelo de simulación de la red primaria, para realizar el análisis hidráulico de diseño.	184
Figura 3-3. Fases de la modelación de los sistemas hidráulicos a presión.....	185
Figura 3-4. Esquema típico de un modelo de red de distribución de agua potable.....	185
Figura 3-5. Aplicación de las leyes de Kirchoff a una red.	187
Figura 3-6. Representación de demandas de agua en el modelo de la red.	187
Figura 3-7. Propiedades y resultados en el modelo de simulación de flujo permanente y periodos extendidos.....	188
Figura 3-8. Entorno gráfico del programa Epanet V.2.0 en español.....	192
Figura 3-9. Relación de conexiones domiciliarias de la red contra nodos en el modelo de simulación (Ref. 3.3).	193
Figura 3-10. Fondo de referencia para el modelo de simulación hidráulica de la red de agua potable de una zona de la ciudad de México.	194
Figura 3-11. Esqueletización de la red secundaria de una zona de la ciudad de México.....	196
Figura 3-12. Esqueletización de la red primaria de una zona de la ciudad de México.	198
Figura 3-13. Cotas del modelo de simulación del ejemplo de la zona de la ciudad de México.	200
Figura 3-14. Caudales de demanda de agua máxima horaria en el modelo de simulación.....	202
Figura 3-15. Curva característica típica de operación de equipos de bombeo de fabricantes.....	203
Figura 3-16. Curva de bombeo medida en campo y capturada en el modelo de simulación de la red primaria.	204
Figura 3-17. Verificación del aislamiento de dos sectores en el modelo de simulación hidráulica de la zona de la ciudad de México.	208
Figura 3-18. Resultados de la modelación de sectores de anteproyecto en la red secundaria de una zona de la ciudad de México.....	210
Figura 3-19. Ejemplo de diagrama unifilar de la red primaria de una zona de la ciudad de México, con sus valores de caudales máximos diarios de diseño.	212
Figura 3-20. Resultados de la simulación de la red primaria existente con los caudales de diseño en una zona de la ciudad de México.	214
Figura 3-21. Resultados observados en el modelo con el diseño final de la red primaria de la zona de la ciudad de México.	216
Figura 3-22. Vista de dos DHs ubicados dentro del sector SH-2 de la ciudad del ejemplo.....	218
Figura 3-23. Detalles de los distritos DH-1 y DH-2 conformados en el modelo de simulación hidráulica.	219
Figura 3-24. Análisis hidráulico del DH-1, sin y con aislamiento físico, respectivamente.	220
Figura 3-25. Análisis hidráulico del DH-2, sin y con aislamiento físico, respectivamente.	221
Figura 3-26. Análisis hidráulico del DH-2 de la ciudad del ejemplo, aislado pero con una entrada y una salida de agua.	222
Figura 3-27. Ejemplos típicos de etiquetado recomendado en el diseño de sectores de la red durante la fase de análisis con el modelo hidráulico, para facilitar elaboración de planos.....	226

Figura 3-28. Ejemplo de un plano general del proyecto de sectorización de red de distribución de agua potable.....	230
Figura 3-29. Ejemplo de un plano ejecutivo de diseño de un sector de la red de distribución de agua potable.....	232
Figura 3-30. Ejemplo de plano de detalles constructivos en proyecto de sectorización de la red de agua potable.....	236
Figura 3-31. Ejemplo de un Plano ejecutivo típico del diseño de un distrito hidrométrico en un proyecto de sectorización de red.....	237
Figura 3-32. Costos de la sectorización de redes de agua potable.....	242
Figura 3-33. Beneficios de la sectorización de redes de agua potable.	242
Figura 3-34. Conceptualización esquemática del desfase en el tiempo de los costos con los beneficios de la sectorización de redes de agua potable.....	243
Figura 3-35. Escala de tiempo de inversiones de la implementación del proyecto de la sectorización de la red del ejemplo.....	246
Figura 3-36. Escala de tiempos de inversiones y beneficios del ejemplo.	255
Figura 4-1. Problemas típicos que se presentan durante los recorridos de inspección en campo de las obras que se modificarán según el diseño de la sectorización de la red de agua.....	264
Figura 4-2. Vista general del diseño de un sector de la ciudad del ejemplo.....	266
Figura 4-3. Modelo de simulación hidráulica del diseño original del sector de la ciudad del ejemplo.....	266
Figura 4-4. Plano del sector de proyecto ampliado en su diseño original, en la ciudad del ejemplo.	267
Figura 4-5. Resultados de caudal y presión en el modelo de simulación hidráulica del sector ampliado en su diseño original, de la ciudad del ejemplo.	267
Figura 4-6. Ejemplo de diagrama de flechas de Ruta crítica, elaborado para la implementar un sector hidrométrico de proyecto en la red de una ciudad.	269
Figura 4-7. Calendario global para la implementación de todo el proyecto de sectorización de la red de agua potable de la ciudad del ejemplo.....	270
Figura 4-8. Ejemplos de bombeo de achique ineficaz durante la construcción de obras de sectorización de la red.....	272
Figura 4-9. Ejemplos de seguridad en la ejecución de trabajos de sectorización de redes de agua potable.....	273
Figura 4-10. Ejemplos de afectaciones ocurridas durante trabajos de sectorización de redes de agua potable.....	275
Figura 4-11. Procedimiento de construcción de cajas e instalación de válvulas.	279
Figura 4-12. Ejemplos de cortes de tuberías para aislar sectores o redistribuir caudales en su red interior.....	280
Figura 4-13. Imágenes del ejemplo de instalación de tuberías en trabajos de sectorización de la red de agua potable.	284
Figura 4-14. Ejemplo de reconexión de tubería de tres pulgadas para unir dos tramos que actualmente están desconectados.	285
Figura 4-15. Ejemplo de reconexión de tubería de ocho a cuatro pulgadas para derivar caudal hacia otra zona.	285
Figura 4-16. Ejemplo de estación de aforo con un medidor fijo en un sector hidrométrico para registro de caudal continuo.	287
Figura 4-17. Ejemplo del interior de una estación de aforo para medición de caudal con equipos portátiles.	288
Figura 4-18. Especificaciones de instalación de medidores del volumen de agua suministrada. Fuentes: Badger Meter de las Américas y “Manual técnico de bolsillo de medidores de pozos” IMTA.	291
Figura 4-19. Ejemplo de selección del medidor electromagnético de un catálogo de fabricante de equipos de medición, con base en el caudal.	292

Figura 4-20. Medidor observado en campo que tiene en su cuerpo el modelo, marca y la capacidad.	293
Figura 4-21. Clasificación de medidores de agua en conducciones a presión.	294
Figura 4-22. Ficha técnica de inspección de medidor en un pozo de suministro de agua potable a la red de distribución.	295
Figura 4-23. Curva característica de errores de exactitud de medidores de caudal.	295
Figura 4-24. Ubicación del medidor en pozos, con distancias especificadas por fabricante.	298
Figura 4-25. Ubicación de medidor de caudal a la descarga de un tanque, con protección y tubería con “cuello de ganso” para lograr tubo lleno.	298
Figura 4-26. Manómetros fijo y portátil para medición de presión del agua en tuberías.	299
Figura 4-27. Tipos de válvulas de control en tuberías sistemas de agua potable.	300
Figura 4-28. Tipos de válvulas comerciales de control automático.	300
Figura 4-29. Aplicación práctica de la válvula limitadora de caudal en un sistema hidráulico a presión.	301
Figura 4-30. Válvula limitadora de caudal instalada en tubería de 10 pulgadas de diámetro.	302
Figura 4-31. Aplicación típica de las válvulas sostenedoras de presión en una red de agua potable.	302
Figura 4-32. Válvula sostenedora de presión de seis pulgadas de diámetro, instalada en una derivación a la red de agua.	303
Figura 4-33. Aplicación típica de la válvula reguladora de presión en sectores de redes de agua potable.	303
Figura 4-34. Gráfica de fabricante para determinar riesgo de cavitación en válvulas de asiento plano de control automático.	305
Figura 5-1. Acciones de operación y mantenimiento de sistemas de agua potable, según su finalidad.	312
Figura 5-2. Clasificación de planos en un sistema de agua potable.	315
Figura 5-3. Mediciones hidráulicas para elaborar estadísticas de operación del sistema de agua potable.	316
Figura 5-4. Mediciones de calidad de agua en sistemas de agua urbanos.	317
Figura 5-5. Imágenes y diagramas de manuales prácticos de operación y mantenimiento.	319
Figura 5-6. Herramientas y equipos utilizados en el mantenimiento de sistemas de agua potable.	320
Figura 5-7. Ejemplos de equipos de medición utilizados en la operación y mantenimiento.	321
Figura 5-8. Medios de capacitación a personal de los sistemas de agua potable.	322
Figura 5-9. Prueba de aislamiento físico del sector sin suministro de agua hacia su interior y zonas de la red aledañas con servicio de agua.	324
Figura 5-10. Prueba de aislamiento físico del sector con suministro de agua hacia su interior y zonas de la red aledañas con o sin servicio de agua.	325
Figura 5-11. Curva de demanda con y sin servicio continuo en la red.	326
Figura 5-12. Subzonas dentro del sector hidrométrico, aislables con movimientos de válvulas.	327
Figura 5-13. Proceso de la puesta en operación de sectores de la red.	328
Figura 5-14. Sector de distribución con la ubicación de puntos de medición, curva de variación del caudal y valores de presión en demanda máxima.	333
Figura 5-15. Procedimiento para llevar a cabo la auditoría de fugas de corta duración en campo.	338
Figura 5-16. Vista en planta del sector hidrométrico del ejemplo de auditoría de fuga de corta duración y Registro del medidor electromagnético colocado a la entrada del sector del ejemplo.	339
Figura 5-17. Gráfica del registro de caudal a la entrada del sector hidrométrico del ejemplo.	341
Figura 5-18. Ejemplo de sector con subzonas aislables temporalmente con movimientos de válvulas.	344
Figura 5-19. Registro de caudales durante la prueba de subdivisión nocturna de un sector del ejemplo.	344

Figura 5-20. Medición continua de caudal antes de la prueba (sin cierre de conexiones domiciliarias) en el sector del sistema de abastecimiento de agua potable del ejemplo.	347
Figura 5-21. Medición continua de caudal (con el cierre de conexiones domiciliarias).	347
Figura 5-22. Esquema de la prueba de eficiencia en sector hidrométrico.	348
Figura 5-23. Curva de variación del caudal de fugas con la presión hidráulica en el sector hidrométrico.	349
Figura 5-24. Equipos comerciales de lectura remota y procesamiento de facturas de volumen en micromedidores de usuarios.	352
Figura 5-25. Clasificación de usos no autorizados en sistemas de abastecimiento de agua potable.	353
Figura 5-26. Procedimiento para identificar las pérdidas aparentes en sectores hidrométricos de la red de agua potable.	355
Figura 5-27. Inspección, desarme y limpieza de una válvula automática reductora de presión debida a una obstrucción.	360
Figura 5-28. Inspección, desarme y limpieza de una válvula automática reductora de presión expuesta a vandalismo y falta de mantenimiento.	360
Figura 5-29. Válvulas de compuerta y reductora de presión, deterioradas por la falta de mantenimiento.	361
Figura 5-30. Ficha técnica tipo para reporte de limpieza de cajas de válvulas azolvadas, inundadas o con basura.	362
Figura 5-31. Ejemplo de medidores con alto grado de deterioro por la falta de mantenimiento.	363
Figura 5-32. Ejemplo de reemplazo de medidor dentro del mantenimiento a un tren de descarga de pozo en un sector de la red.	365
Figura 5-33. Ejemplo de actualización de plano, por la construcción de nuevos fraccionamientos en el sector de diseño original.	366
Figura 5-34. Modelos de simulación hidráulica del sector del ejemplo, cumpliendo rangos de presión y caudal del diseño original.	366
Figura 5-35. Proceso para actualizar continuamente el plano y modelo de simulación hidráulica de sectores, ante los cambios de infraestructura, operación y mantenimiento.	367
Figura A-1. Modelación hidráulica integrada con algoritmos para la simulación de redes de agua potable, propuesta por Tzachtko, Alcocer y Bourguett.	376
Figura A-2. Representación de un sistema de agua potable mediante grafos.	376
Figura A-3. Grafo dirigido y su homólogo reordenado tras aplicar su ordenamiento topológico.	378
Figura A-4. Identificación de una malla básica o independiente en un grafo. Fuente: Vegas y Martínez (Ref. A.5).	378
Figura A-5. Conjunto de corte de un grafo. Fuente: Vegas y Martínez (Ref. A.5).	379
Figura A-6. Secuencia de pasos para llevar a cabo la sectorización de la red con el algoritmo de Vegas y Martínez.	380
Figura A-7. Diagrama del proceso para obtener los grandes sectores en la red.	380
Figura A-8. Concepto del cálculo de la concentración de una sustancia conservativa en nodos de distribución y mezcla en una red. Fuente: Tzachtkov et.al. Ref. A.1	381
Figura A-9. Esquema de la red del ejemplo, con valores de presión y caudal.	382
Figura A-10. Grandes sectores identificados en el esquema de la red del ejemplo.	382
Figura A-11. Red arterial identificada en la red del ejemplo para tubos mayores a 200 mm.	383
Figura A-12. Árboles dirigidos de mínimo costo de la red del ejemplo.	384
Figura A-13. Esquema de sectores resultante en la red del ejemplo.	385
Figura A-14. Herramienta de sectorización en el GisRed, con el algoritmo de Vegas y Martínez.	386

CUADROS

Cuadro 1-1. Procesos del sistema de agua potable y su impacto típico en el consumo de la energía eléctrica (Ref. 1.2).....	22
Cuadro 1-2. Valor mínimo de eficiencia electromecánica de equipos de bombeo, especificados en las NOM-006-ENER-2015.	23
Cuadro 1-3. Medidas de ahorro de energía eléctrica de mediano plazo en equipos de bombeo.....	27
Cuadro 1-4. Clasificación del nivel de deterioro de tuberías, según la OFWAT.....	28
Cuadro 2-1. Períodos de diseño para elementos de sistemas de agua potable (Ref. 2.1).....	50
Cuadro 2-2. Vida útil de elementos de un sistema de agua potable y alcantarillado (Ref. 2.1).....	51
Cuadro 2-3. Ejemplo de información de pozos por recolectar.....	52
Cuadro 2-4. Ejemplo de datos de tanques de regulación por recolectar.	52
Cuadro 2-5. Ejemplo de recolección de datos de rebombeos.	53
Cuadro 2-6. Ejemplo de recolección del inventario de tuberías.	53
Cuadro 2-7. Datos de población del ejemplo.	74
Cuadro 2-8. Datos de cálculo de población del ejemplo.....	74
Cuadro 2-9, Datos de población del ejemplo de ajuste logístico.	77
Cuadro 2-10. Elección de datos históricos del ejemplo de ajuste logístico.	77
Cuadro 2-11. Cálculo de error relativo del ajuste logístico del ejemplo.....	78
Cuadro 2-12. Datos de población observados en una zona de la ciudad de México, en el ejemplo.	86
Cuadro 2-13. Resultados del cálculo de población de cada zona de operación del ejemplo.	90
Cuadro 2-14. Errores de exactitud en medidores fijos de captaciones de agua, derivados de pruebas de campo.	94
Cuadro 2-15. Información por colector, para determinar los consumos valorados unitarios de usos de agua sin medidor.	102
Cuadro 2-16. Información estadística de consumos no domésticos con registros de medición del ejemplo.....	105
Cuadro 2-17. Información característica del desarrollo turístico que se conectará a la red de agua del ejemplo.....	105
Cuadro 2-18. Cálculo de consumos unitarios de usos no domésticos del ejemplo.....	106
Cuadro 2-19. Volumen de agua a suministrar de la red para el nuevo desarrollo del ejemplo.....	106
Cuadro 2-20. Clasificación de clases socioeconómicas para estimación de consumo de agua. Fuente: Comisión Nacional del Agua (Ref. 2.1).....	107
Cuadro 2-21. Datos de la muestra de mediciones de consumo del ejemplo.	109
Cuadro 2-22. Resultados del muestreo de consumos unitarios del ejemplo.....	109
Cuadro 2-23. Consumos unitarios para uso doméstico, especificados por la Conagua en México.	110
Cuadro 2-24. Clasificación del clima en función de la temperatura media, Conagua, México.....	110
Cuadro 2-25. Consumos unitarios no domésticos, publicados en México, para la planeación y diseño de sistemas de agua potable.	112
Cuadro 2-26. Factores que afectan la exactitud de datos y ajustes en el balance hídrico.	118
Cuadro 2-27. Ejemplo de la aplicación de un balance de agua potable (período anual).....	120
Cuadro 2-28. Método estadístico para discriminar fugas potenciales propuesto en 1996 (Ref.2.4).....	121
Cuadro 2-29. Resultados del muestreo de usos ilegales del ejemplo.....	123
Cuadro 2-30. Volúmenes de pérdidas aparentes potenciales por usos fraudulentos, del ejemplo.....	123
Cuadro 2-31. Valores de consumo relacionados con las condiciones de higiene del ser humano, OMS.	125
Cuadro 2-32. Proyección de población de la localidad del ejemplo.	128
Cuadro 2-33. Proyección de la demanda de agua del ejemplo.....	128

Cuadro 2-34. Distribución espacial de caudales (en porcentaje) de demanda por la población de una ciudad ficticia; incluyen gastos de fugas.	142
Cuadro 2-35. Resultado del balance de caudales en la red de agua potable de una ciudad ficticia.	144
Cuadro 2-36. Población futura por zonas de influencia en el noroeste de la ciudad del ejemplo.	145
Cuadro 2-37. Caudales suministrados actualmente a zonas de influencia en el noroeste de la ciudad del ejemplo.	146
Cuadro 2-38. Valores de caudales demandados por zona de influencia en el noroeste de la ciudad del ejemplo.	148
Cuadro 2-39. Comparación final entre caudales máximos requeridos (demandados) menos caudales suministrados en el noroeste de la ciudad del ejemplo.	150
Cuadro 2-40. Resultado del balance de caudales actual y del esquema de sectores de proyecto en la ciudad ficticia del ejemplo.	157
Cuadro 2-41. Ejemplo de tabulación de datos de la curva de suministro y demanda de agua, y diferencias acumuladas.	161
Cuadro 2-42. Datos y resultados del balance de caudales en zonas de influencia N2, N3 y N4 de la ciudad real del ejemplo.	162
Cuadro 2-43. Datos y resultados del balance de caudales en sectores de proyecto SH2, SH3 y SH4 de la ciudad real del ejemplo.	164
Cuadro 2-44. Datos y resultados del balance de caudales en la ciudad real del caso 2, con una reducción de fugas al 20% del caudal suministrado.	165
Cuadro 2-45. Datos y resultados del balance de caudales en la ciudad real del caso 2, con los sectores de proyecto y una reducción de fugas al 20% del caudal suministrado.	166
Cuadro 3-1. Listado de modelos elaborados por el autor en programa Epanet (Ref. 3.3).	192
Cuadro 3-2. Ejemplo del cálculo del caudal de demanda en cada nodo del modelo de la red secundaria de una zona de la ciudad de México.	201
Cuadro 3-3. Coeficientes de pérdida de carga hidráulica de válvulas completamente abiertas.	205
Cuadro 3-4. Ejemplo del listado de cantidades de obra a ejecutar en un proyecto de sectorización de red.	238
Cuadro 3-5. Ejemplo clásico de un presupuesto base de un proyecto de sectorización.	240
Cuadro 3-6. Ejemplo del costo de un equipo de bombeo para un pozo de suministro de agua potable.	244
Cuadro 3-7. Datos estadísticos del ejemplo de costo de fugas.	247
Cuadro 3-8. Resultados del costo de reparación de fugas del ejemplo.	248
Cuadro 3-9. Cambio en los caudales, cargas hidráulicas y eficiencia del conjunto bomba-motor con el proyecto de sectorización de la ciudad del ejemplo.	251
Cuadro 3-10. Beneficios económicos por el ahorro de energía por el paro definitivo de equipos de bombeo en un ejemplo de diseño de red sectorizada.	254
Cuadro 3-11. Inversiones programadas para implementar sectores del ejemplo.	255
Cuadro 3-12. Beneficios económicos acumulados al implementar los sectores del ejemplo.	255
Cuadro 3-13. Flujo de dinero a valor presente en la implementación del proyecto de sectores en la red del ejemplo.	256
Cuadro 4-1. Características comerciales y de mercado de medidores de caudal.	296
Cuadro 5-1. Datos de sectores de la red de la ciudad el ejemplo.	334
Cuadro 5-2. Registros de 24 horas continuas de caudal y volumen suministrado al sector SH2 del ejemplo.	334
Cuadro 5-3. Registros de presión de diferentes puntos de la red del sector SH2 del ejemplo.	334
Cuadro 5-4. Resultados de la evaluación de la relación entre caudal suministrado y requerido del a red del ejemplo.	336
Cuadro 5-5. Resultados de la prueba de subdivisión nocturna en el sector del ejemplo.	345

PRÓLOGO

Uno de los grandes desafíos que enfrentamos hoy en los sistemas de agua potable y saneamiento en México es avanzar hacia una mayor eficiencia operativa sin perder de vista la sostenibilidad, la calidad del servicio y la inclusión social. En este contexto, la sectorización de redes de agua potable no es simplemente una opción técnica, sino una herramienta estratégica para recuperar caudales, reducir pérdidas, mejorar la gestión de presiones y, sobre todo, construir organismos operadores más resilientes ante los desafíos del presente y del futuro.

El Dr. Leonel H. Ochoa Alejo, con la experiencia de décadas de trabajo en campo, ha sabido sistematizar en esta obra no sólo los fundamentos teóricos de la sectorización, sino también las mejores prácticas, metodologías y criterios técnicos que han sido probados en distintas ciudades del país. Esta segunda edición representa una actualización valiosa y oportuna que recoge aprendizajes, innovaciones y la evolución natural del enfoque hacia una “sectorización integrada a la eficiencia hidráulica del sistema”.

Desde la ANEAS, reconocemos que mejorar la eficiencia física y volumétrica de nuestros organismos asociados implica también profesionalizar sus equipos técnicos, fortalecer sus capacidades de planeación, incorporar tecnología y adoptar enfoques de gestión basados en datos. Este libro contribuye de manera contundente a ese propósito, brindando a ingenieras, ingenieros, directivos y personal operativo una guía clara, práctica y sustentada en evidencia para avanzar en esa dirección.

Esta obra es también un testimonio del compromiso del autor con el fortalecimiento institucional del sector. En un entorno en el que los recursos financieros son limitados, la implementación de soluciones eficientes, medibles y escalables como las aquí descritas, marcan la diferencia entre sistemas frágiles y sistemas con capacidad de adaptación y mejora continua. Este libro también nos recuerda que la eficiencia no es una meta aislada, sino parte de una visión integral que incluye el cuidado del agua, la salud pública y la sostenibilidad de las ciudades.

Las y los lectores encontrarán en sus páginas una ruta detallada para planear, diseñar, construir, operar y mantener redes sectorizadas, con criterios modernos y alineados a los estándares nacionales e internacionales.

Como Presidente de la ANEAS, puedo afirmar que esta publicación representa el tipo de aportes que necesitamos multiplicar: conocimiento útil, contextualizado y generado desde la práctica, con impacto directo en la mejora del servicio y en la construcción de confianza con la ciudadanía. Celebro esta segunda edición y felicito al autor por su generosidad al compartir su experiencia. Estoy convencido de que este libro seguirá siendo una fuente de consulta permanente y una inspiración para quienes, día a día, trabajan por un mejor sistema de agua potable para todos y todas. Que esta obra siga abonando al camino de la eficiencia, la resiliencia y la excelencia técnica que tanto requiere el sector.

Ing. José Lara Lona
Presidente del Consejo Directivo de la ANEAS

PREFACIO

La sectorización de redes de agua potable se inició en México a partir de la década de los años 90, con la intención principal de evaluar y reducir los volúmenes fugas de agua. Se estimó que en promedio en las redes mexicanas se perdía alrededor del 38% del volumen de agua suministrado por las captaciones del sistema. La idea de sectorizar las redes en México se originó al tratar de evaluar los niveles de fugas con los llamados Distritos Hidrométricos. En aquel entonces, para lograr el aislamiento de una zona, era necesario realizar muchos movimientos de válvulas, lo cual afectaba el servicio de agua al resto de los usuarios de la red. Esta situación era ocasionada porque no se tenían condiciones diseñadas y planeadas para operar la red en estas circunstancias.

Adicionalmente, debido a los resquebrajamientos financieros de los organismos operadores municipales que se encargan de la administración y operación de los sistemas de agua potable en México, a los excesivos niveles de fugas existentes, y a que el agua de una fuga que es reparada, migra hacia otras zonas de falla de la red, se pensó que era necesario realizar la reducción de las fugas de agua aplicando la sectorización como un proceso estratégico; esto es, si se aislaba una parte de la red, las fugas no podrían migrar hacia otras zonas, el agua era recuperada en el corto plazo, la inversión podía recuperarse prontamente y la rehabilitación de la red podía programarse para un mediano plazo con beneficios durante el proceso.

En consecuencia, se establecieron criterios para implementar los distritos hidrométricos en las redes mediante una metodología que fue ganando popularidad con el paso de los años, hasta volverse el tema recurrente de solución para el problema de fugas.

Desafortunadamente, después de un poco más de diez años de aplicación de la técnica y con todas las inversiones económicas que se realizaron, el problema de las fugas no había sido resuelto, permaneciendo niveles del orden del 35% del agua suministrada; el avance promedio anual de implementación era de cuatro a ocho distritos en cada ciudad que los ejecutaba, en el mejor de los casos; el número de distritos que se diseñaban por ciudad resultó muy alto, aproximadamente un distrito por cada 2,000 tomas domiciliarias; esto es, en una ciudad de 90,000 tomas domiciliarias se programaba entre 45 a 60 distritos, lo cual implicaba un período de cinco a ocho años de implementación.

La causa de haber llegado a este punto del proceso sin los resultados esperados en la reducción de fugas radicó, fundamentalmente, en que erróneamente se aplicó la técnica de distritos hidrométricos sin considerar el funcionamiento integrado del sistema de distribución de agua potable, lo cual causó efectivamente una reducción de las fugas, pero no el mejoramiento de la distribución hidráulica y, por ende, un buen nivel de servicio a los usuarios. Por ejemplo, varios distritos hidrométricos quedaron interconectados entre sí y, aunque se tenía un registro de los volúmenes que entraban o salían del distrito, no era posible controlar la migración de las fugas hacia otras zonas de la red que aún no habían sido aisladas. También, como en la mayoría de los casos no se integraron los distritos al sistema de distribución primaria de la red, el servicio de agua a los usuarios de un distrito dependía de otro y otro y, finalmente, la gran cantidad de distritos resultantes en un solo sistema de distribución, complicó las actividades de operación y mantenimiento.

Por estas realidades, a partir del año 2005 el autor con un grupo de ingenieros, plantearon una nueva estrategia con un proceso diferente denominado “Sectorización de redes integrada a la eficiencia hidráulica del sistema”, el cual se fundamenta en equilibrar primero los volúmenes de agua demandados en los sectores aislados, con el suministro de agua producido en las captaciones y, posteriormente, implementar la reducción y control de fugas y regularización del uso del agua. El proceso se basa en cinco lineamientos generales: 1) que considere la información disponible, generando un mínimo de datos complementarios, 2) que se aproveche al máximo la infraestructura existente, 3) que arroje soluciones prácticas, económicas y de implementación en el corto plazo, 4) que garantice mejor calidad y continuidad del servicio de agua a los usuarios y 5) que induzca el incremento de la eficiencia volumétrica, hidráulica y energética del sistema. Esta práctica se confirma con los resultados de los casos de estudio desarrollados a la fecha en varias ciudades mexicanas, con este nuevo procedimiento.

El proceso de sectorización de redes integrada a la eficiencia hidráulica del sistema fue desarrollado y aplicado por primera vez en la ciudad de Zihuatanejo, Guerrero. Al llevar a cabo las recomendaciones del proyecto, se incrementó la continuidad de servicio y se obtuvieron ahorros de energía hasta en un 60% del consumo original, generados por las mejoras en la operación y distribución.

Con el proyecto de Zihuatanejo como base, en junio del 2006 comenzó el segundo proyecto en la ciudad de Monclova, Coahuila, terminando una primera etapa en diciembre del mismo año, y la segunda etapa en agosto del 2007. A partir de entonces, los proyectos de sectorización se han aplicado en distintas ciudades de la república mexicana, entre las que destacan: Hidalgo del Parral en Chihuahua, Metepec y Toluca, Estado de México; Nogales y Guaymas, Sonora; la ciudad de Durango, Durango, Cuernavaca, Morelos y Acámbaro en Guanajuato y, recientemente, en el sistema de agua potable de la ciudad de México (Sacmex). A la fecha de la segunda edición del libro, la lista de ciudades se ha incrementado notablemente con la participación de empresas privadas, organismos operadores, instituciones estatales y municipales y la Comisión Nacional del Agua (Conagua).

Las razones de escribir el presente libro obedecen a la intención de que las personas involucradas en el quehacer de los sistemas de abastecimiento de agua potable cuenten con un documento técnico, de ayuda en el diseño del proyecto de sectorización de la red y de orientación en la construcción, puesta en operación y mantenimiento continuo de la red sectorizada; a que los jóvenes ingenieros de las nuevas generaciones dispongan de un libro de texto que sea complementario a sus libros básicos de su formación académica y, finalmente, al deseo de que toda la experiencia vivida por el autor, las instituciones y los organismos operadores en la sectorización de redes, desde hace dos décadas, se conserve y sea aprovechada por las futuras generaciones.

Dr. Leonel H. Ochoa Alejo

INTRODUCCIÓN

En nuestra época, el agua para consumo humano se extrae principalmente de los acuíferos, ríos o lagos y después de un proceso de purificación es conducida hacia los habitantes de una población a través de una red de tuberías enterradas bajo las calles. Se utilizan, frecuentemente equipos de bombeo para impulsar el agua por las tuberías y es común encontrar uno o varios depósitos o tanques elevados y superficiales para almacenar y regular el suministro del agua a la población. El agua se entrega a las casas, comercios, hoteles e industrias por medio de tuberías individuales llamadas “tomas domiciliarias” o “acometidas”. Este servicio de abastecimiento de agua potable lo administra, opera y mantiene una institución denominada “organismo operador” o, en ocasiones, alguna empresa privada o asociación civil.

Otra forma de distribuir el agua para consumo humano en nuestros tiempos es por medio de envases, botellas o garrafones, entregados por camiones en los comercios para la venta al público. Este tipo de servicio lo ofrecen diversas empresas privadas.

A diferencia del agua entubada, que se usa para beber, bañarse, lavar trastes y ropa, regar jardines, etcétera, el agua envasada generalmente es utilizada solo para beberla, por el alto costo que representa para las personas. El agua de un sistema de tuberías le cuesta al usuario aproximadamente entre 1,000 y 3,000 veces menos que el agua envasada.

No obstante, el proceso de producción y distribución del agua envasada puede ser controlado totalmente, de tal manera que dicha agua se conserva y transporta herméticamente con oportunidad para el consumidor, sin que pierda su volumen ni propiedades de purificación.

En cambio, el agua distribuida por las tuberías enterradas representa una obra compleja de ingeniería hidráulica y sanitaria, donde intervienen diversos procesos de producción, purificación, conducción, regulación y distribución que dependen en buena medida de la disponibilidad espacial y temporal del agua en los acuíferos, ríos y lagos, y del comportamiento de la demanda de agua de los usuarios conectados a la red de tuberías. En estos procesos interactúan la tecnología, la economía, la sociedad y la legislación vigentes, con un solo fin: “Otorgar el servicio de agua potable a los usuarios para su salud, con calidad, cantidad y oportunidad, en condiciones de rentabilidad y sostenibilidad del sistema de abastecimiento, del organismo operador y del medio ambiente.”

En la actualidad, se ha establecido que la mejor opción para el trazo de las redes de tuberías de distribución de agua potable sea por medio de sectores hidrométricos, los cuales son áreas de la red delimitadas geográficamente y aisladas unas de otras, con una obra de captación directa e independiente. Este tipo de diseño favorece el control de fugas y facilita la distribución hidráulica. En el pasado se diseñaban las redes con el denominado “Método de Cross” analizando solo los circuitos principales y la tubería secundaria era considerada de relleno. En cambio, hoy en día existen modelos de simulación y software comercial con los que se puede diseñar todos los tramos y nodos de la red a una velocidad tal que permite realizar cálculos en cuestión de segundos. De esta manera, las opciones de análisis se multiplican y es posible mejorar los diseños de sectores hidrométricos en redes de agua potable.

Por lo tanto, se pone de manifiesto la importancia de conocer la ingeniería hidráulica moderna, aplicada a la planeación, diseño, operación y mantenimiento de la sectorización de redes de distribución de agua potable; así como los eventos técnicos, climáticos y sociales que pueden poner en riesgo el funcionamiento de este sistema y provocar situaciones de escasez, ineficiencia, mala calidad y discontinuidad en el servicio de agua potable.

En el presente libro se exponen los conceptos del aprovechamiento del agua para su uso en poblaciones y de la ingeniería hidráulica de sectorización de redes requeridos para otorgar un servicio de calidad a los usuarios, con un enfoque de eficiencia y seguridad para el sistema de agua potable y al medioambiente.



CAPÍTULO 1

EL SISTEMA DE AGUA POTABLE

1.1 PROPÓSITO, COMPONENTES Y REQUISITOS

Un sistema de abastecimiento de agua potable es un conjunto de obras de ingeniería diseñadas, construidas y operadas con el fin universal de contribuir a la preservación de la salud del ser humano. La salubridad de una población depende, entre otros factores, de la cantidad y calidad del agua suficiente para cubrir sus necesidades y constituye una de las bases del urbanismo moderno.

Las obras de ingeniería para el suministro y distribución de agua potable han hecho que se reduzcan considerablemente los índices de morbilidad, evitando casi totalmente epidemias de muchas enfermedades. Un sistema de abastecimiento de agua potable es fundamental para el desarrollo económico y social de las poblaciones y fomenta hábitos higiénicos en los habitantes, integrándolos más a la civilización y cultura.

Una población se abastece de agua potable con varios propósitos: para beber y cocinar; para baño, lavado de ropa y utensilios; para riego de prados y jardines; para fines comerciales e industriales; para eliminar desechos domésticos e industriales; para el combate de incendios y otros usos más.

De forma general, un sistema de abastecimiento de agua potable consta de las principales obras siguientes (*Figura 1-1*):

- a) Captación (pozo, presa, galería, toma, etc.).
- b) Rebombeo.
- c) Conducción.
- d) Purificadora.
- e) Tanque de regulación.
- f) Red de distribución.
- g) Tomas domiciliarias.

Los sistemas de abastecimiento de agua potable varían en su configuración; pueden incluir menos obras que las descritas o disponer de simplificaciones en sus esquemas combinados. Aparte de pozos y presas, existen otros tipos de obras de captación, tales como galerías filtrantes, desalinizadoras, tanques de lluvia, etc. Los tanques de regulación y rebombes se encuentran frecuentemente dentro de la red de distribución. La purificadora en muchas ocasiones es un simple equipo inyección de gas cloro. Los tanques son de tipo superficial o elevado, de concreto, acero o mampostería. Las tuberías de la red de distribución forman circuitos cerrados o ramificaciones abiertas, cuentan con válvulas de seccionamiento, de control de presión y caudal. Las tomas domiciliarias se instalan para uso doméstico, comercial, industrial y de usos públicos, en material de cobre, acero galvanizado, polietileno de alta densidad, PVC. En la *Figura 1-2* se muestran imágenes de algunas de estas obras de abastecimiento.

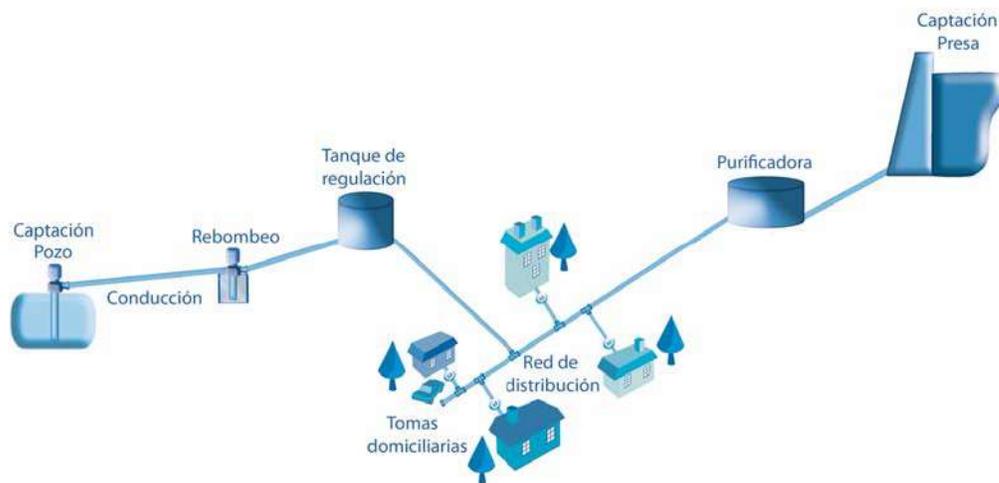


Figura 1-1. Componentes típicos de un sistema de abastecimiento de agua potable.



Figura 1-2. Algunas obras de infraestructura de los sistemas de abastecimiento de agua potable.

Fuentes: <http://liderennoticias.blogspot.com/2011/04/colonia-caroya-nuevo-paso-para-la-obra.html>
<http://www.aguasolutions.com/fundamentals-sp.html>
http://www.radiojai.com.ar/online/notiDetalle.asp?id_Noticia=54935
http://es-la.facebook.com/note.php?note_id=18055565417

Desde el punto de vista hidráulico, un buen sistema de agua potable debe suministrar agua de buena calidad, en cantidad suficiente, a la presión necesaria, a toda hora y en todos los puntos de la localidad. Hay que tener en cuenta también que todo sistema de abastecimiento de agua potable debe cumplir con normas oficiales obligatorias, especificaciones y requerimientos sobre el estado físico, químico y biológico del agua y su funcionamiento hidráulico. El cumplimiento de ello será la base de la eficiencia con que se otorgue el buen servicio de agua potable a los usuarios; el efectivo uso de los recursos

humanos, materiales, financieros; el ahorro de energía eléctrica; la conservación de los recursos naturales y el logro de la sustentabilidad del sistema a través de los años.

1.2 LA DISPONIBILIDAD Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA

La calidad y cantidad del agua que se encuentra en la naturaleza es muy variable y depende de las condiciones geográficas y climáticas del planeta; de la oportunidad que tenga para disolver gases, sustancias minerales y orgánicas; de la temperatura, volumen, flora microbiana y de la contaminación provocada por las actividades propias del ser humano.

El agua forma parte del “ciclo hidrológico”, que engloba la circulación del agua en la naturaleza, desde el mar hasta la atmósfera, desde la atmósfera hasta la tierra y de la tierra al *mar* (Figura 1-3). En este ciclo se encuentra toda el agua aprovechable para el abastecimiento de agua potable.

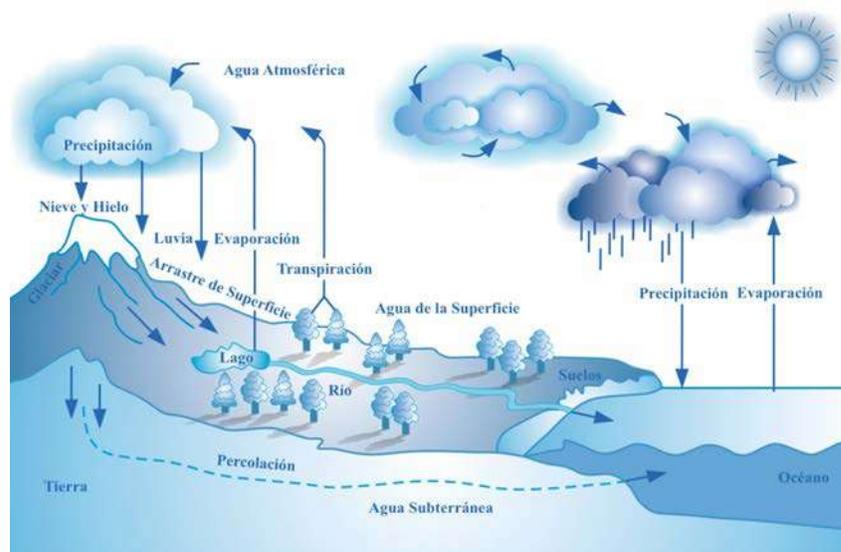


Figura 1-3. Ciclo hidrológico del agua.

La finalidad de la ingeniería de abastecimiento de agua potable es investigar cuánta agua se dispone en una localidad y en sus alrededores para captarla, purificarla, conducirla y distribuirla y ponerla al servicio de sus pobladores.

El agua disponible en el planeta se clasifica en: agua meteórica (lluvia, nieve, granizo, rocío); agua superficial (ríos, arroyos, lagos, embalses); agua subterránea (manantiales y acuíferos) y agua de mar (golfos, estuarios). Cuando se utiliza esta agua para el consumo de una población, se dice entonces que es la “fuente de abastecimiento” de dicha población. La obra de ingeniería que se construye para aprovechar el agua de una fuente de abastecimiento se denomina “obra de captación”. En la Figura 1-4 se muestran ejemplos de las fuentes de abastecimiento y obras de captación de una región (Ref. 1.1).

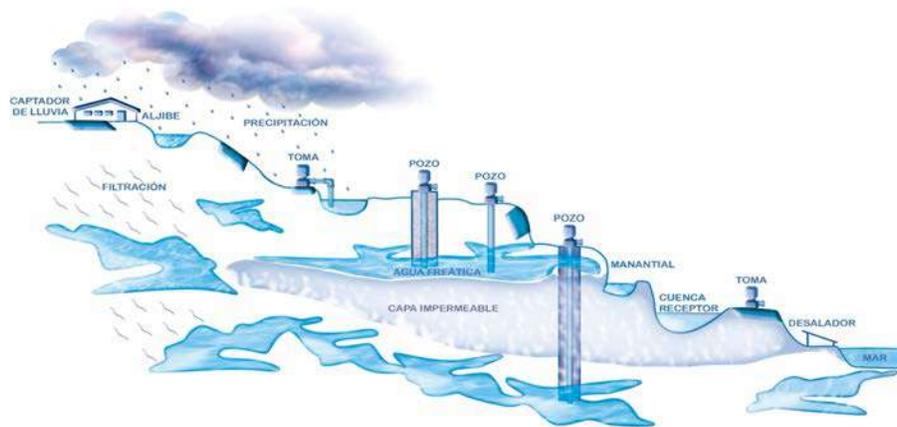


Figura 1-4. Ejemplos de fuentes de abastecimiento y obras de captación de una región.

Las principales fuentes de abastecimiento de agua potable más utilizadas en nuestro país son agua superficial de ríos y agua subterránea de acuíferos, captadas por obras de toma las primeras y pozos profundos las segundas (*Figura 1-5 y Figura 1-6*).



Figura 1-5. Fuente de abastecimiento superficial (río) y obra de captación común en México (obra de toma).



Figura 1-6. Fuente de abastecimiento subterránea (acuífero) y obra de captación común en México (pozo profundo).

En la actualidad existe tecnología para desalinizar el agua del mar y potabilizarla; transportarla a cualquier localidad independientemente de su tamaño, ubicación y altitud; distribuirla a sus habitantes; recolectar el agua residual, tratarla para sanearla y regresarla nuevamente al mar. Desde esta perspectiva, el agua sería suficiente para abastecer a todos los habitantes del planeta, sin problemas de disponibilidad. Sin embargo, el costo de este tipo de desarrollos sería tan alto que los usuarios de tal sistema de abastecimiento de agua no podrían pagarlo.

Es esta la razón principal por la que siempre se buscan fuentes de abastecimiento de agua que se encuentren cercanas a la localidad en estudio; mientras más alejada de la población se ubique la fuente de agua, más costosas serán las obras de abastecimiento y su operación. Aunado al alto costo, cuando se utiliza agua de fuentes que se encuentran fuera de los límites políticos y geográficos de la localidad en cuestión, se suscitan problemas con otras localidades por el uso del agua y se generan conflictos sociales sumamente delicados.

Como se podrá deducir, el aprovechamiento del agua para uso en actividades urbanas es complejo, primeramente, por la escasez o abundancia natural del agua y, en segundo lugar, por las implicaciones económicas, sociales y ambientales que trae consigo su aprovechamiento.

Una de las estrategias más importantes para solucionar esta situación es hacer que el sistema sea eficiente, minimizando las fugas, cumpliendo estándares de continuidad y calidad del servicio en la red de distribución, promoviendo el ahorro del agua por los habitantes y saneando el agua residual antes de regresarla a la naturaleza. De esta manera, es posible desfasar la explotación de nuevas fuentes de abastecimiento de agua y proteger las que se están utilizando.

1.3 CONSERVACIÓN DE LA PURIFICACIÓN DEL AGUA

El agua es potencialmente un vehículo de transmisión de enfermedades, ya que puede contener agentes infecciosos principalmente del cólera, tifoidea, disentería, salmonelosis y amibiasis. Las sustancias radiactivas en concentraciones importantes en el agua dañan al ser humano que consume esa agua. Asimismo, los siguientes elementos en el agua para beber se consideran nocivos si sobrepasan concentraciones límites: arsénico, bario, cadmio, cromo, plomo, flúor, cloro, sulfatos, cianuros y nitratos.

Para que el agua distribuida en un sistema de agua potable pueda ser ingerida por el ser humano y utilizada en sus actividades cotidianas, de manera que beneficie su salud, es necesario que lleve en solución ciertas sustancias que la hacen agradable y nutritiva, como el oxígeno, el bióxido de carbono y sales minerales de potasio, sodio, calcio y magnesio en cantidades pequeñas. Además, debe estar exenta de sustancias nocivas, gérmenes infecciosos, libre de olor y color. La temperatura del agua potable debe fluctuar entre 10 y 15 °C (*Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*).

El agua en su naturaleza, también llamada “agua cruda”, está expuesta a sufrir contaminación por el contacto con suelos y atmósfera durante su ciclo hidrológico. Por ello, es necesario purificar el agua antes de entregarla a los habitantes. Una vez que es utilizada, el agua se contamina por medios artificiales provocados por el ser humano, como desechos de fábricas y agua residual. Para conservar la pureza del agua en estos casos, se construyen plantas de tratamiento para rehabilitarla antes de regresarla a su estado natural.

Cuando se dispone de una fuente de agua natural para el abastecimiento para agua potable, es indispensable someterla a un proceso de purificación antes de distribuirla a la población. Los análisis fisicoquímicos y biológicos del agua se deben practicar para determinar el tipo de obra purificadora por construir.

Las clases más comunes de obras de purificación son las siguientes:

a) **Plantas de filtración.** Remueven el calor, turbidez, bacterias y organismos nocivos por medio de filtros granulares.

b) **Plantas supresoras de hierro y manganeso.** Remueven las cantidades excesivas de estos metales oxidándolos y convirtiéndolos en flóculos insolubles, removibles por filtración y sedimentación.

c) **Plantas suavizadoras.** Remueven las cantidades excesivas de ingredientes que forman incrustaciones y consumen jabón, principalmente calcio y magnesio.

Como parte final de estos procesos de purificación del agua, antes de distribuirla a la red de abastecimiento, se clora para desinfectarla; en algunos casos se agrega cal u otros productos químicos para reducir la corrosión en tuberías metálicas.

Hay tres condiciones que se deben cumplir al momento de buscar una excelencia en la calidad del agua en los sistemas de abastecimiento:

- Que el agua esté libre de microorganismos, sobre todo de organismos patógenos que afecten la salud de los consumidores.
- Que el agua se encuentre libre de contaminantes químicos inorgánicos como metales y sus derivados tóxicos.
- Que el agua se encuentre libre de contaminantes derivados de la industria y de desechos orgánicos producidos por el hombre.

Los sistemas de agua potable suelen enfrentar grandes problemas en cuanto a la calidad de purificación del agua. Aunque se lleven a cabo los procesos de purificación en las captaciones o potabilizadoras de los sistemas de abastecimiento de agua, existe el problema de que en las redes de tuberías es muy fácil para ciertos microorganismos encontrar una entrada al sistema, a través de las fallas, roturas, o fugas.

De esta manera, un sistema de distribución de agua potable provee un hábitat para los microorganismos que son alimentados por nutrientes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua y las tuberías; en especial, los sistemas viejos pueden concentrar depósitos y sedimentos por la corrosión interna de tubos metálicos que favorecerán la concentración de los microorganismos, con la consecuente contaminación del agua que se transporta por la red.

La tarea primordial del organismo operador del sistema de agua potable es encargarse de que las tuberías de la red de distribución tengan una calidad suficiente, para que ni los organismos vivos ni otros contaminantes inorgánicos ingresen al sistema y contaminen el agua que se encuentra ya purificada previamente.

El problema principal radica en que los sistemas de agua potable se encuentran bajo una gran cantidad de condiciones desfavorables para la integridad de sus componentes: altas presiones de agua, envejecimiento de tuberías, fugas, corrosión interna y externa, daños externos, entre otros. Cuando el personal de operación y mantenimiento no puede controlar o estabilizar todas estas condiciones en la infraestructura, el agua se contamina a pesar de todo el esfuerzo llevado a cabo en la purificación previa.

Existen dos contaminantes básicos que se derivan de esta cuestión: a) los microorganismos y b) las sustancias inorgánicas. Estos son los contaminantes que se tratarán en los siguientes incisos.

1.3.1 Contaminación del agua en la red por microorganismos

Las tuberías que forman parte del sistema de agua potable se encuentran casi siempre cubiertas por el suelo, lugar donde los microorganismos son más frecuentes. Debido a esto, es muy probable que en algún punto del sistema se logren colar algunos de estos microorganismos y, así, se produzca un aumento en los niveles de contaminación del agua que está siendo llevada a los usuarios del sistema.

El suelo es la plataforma donde la mayor parte de los microorganismos encuentran una fuente de nutrientes necesaria para su vida y su reproducción. La cantidad de nutrientes, junto con el deterioro de tuberías, válvulas y accesorios, crean un ambiente proclive para que muchos microorganismos se reproduzcan y se distribuyan por toda la red. A pesar de que algunos de estos microorganismos no son patógenos para el ser humano, es decir, que no producen ningún tipo de infección o enfermedad si son consumidos, existen muchas bacterias, protozoarios, hongos y animales que sí pueden producir enfermedades que deben ser tomadas en cuenta. Muchas de estas enfermedades, además, pueden llegar a niveles epidemiológicos altos debido a la facilidad de distribución en los sistemas de agua que se encuentran en las ciudades.

Las tuberías, en especial aquellas en mal estado, están sujetas a un alto nivel de riesgo de ser contaminadas por microorganismos externos que se encuentran viviendo en el suelo y que esperan dispersarse en cuanto les sea posible. El agua es el elemento fundamental de la vida y la mayor parte de los organismos del planeta viven en ella, además de que les sirve como medio de transporte y de reproducción.

Los seres vivos suelen clasificarse en grupos emparentados por características en común. No todos los microorganismos pertenecen al mismo grupo y, por tanto, no pueden ser tratados por igual a la hora de intentar eliminarlos. Algunos tienen ciertas características que les permiten defenderse ante ciertos procesos de desinfección y existen otros que dependen, por su estilo de vida, de otros organismos para su alimentación.

Un microorganismo es simplemente aquel ser vivo que es demasiado pequeño para que sea observado por el ser humano a simple vista. Los microorganismos se dividen en: a) bacterias, b) protozoarios, c) algas, d) hongos y e) animales. A continuación, se describen las principales características que distinguen a estos cinco grupos.

1.3.1.1 Bacterias

Son las más pequeñas de todos los microorganismos. Principales causantes de enfermedades como el cólera, salmonelosis, diarrea, gastroenteritis y tifoidea. Muchas son parasitarias, aunque pueden sobrevivir mucho tiempo fuera de otro organismo. Pueden entrar fácilmente a los sistemas de agua

potable gracias a su diminuto tamaño y a su gran capacidad de movilidad. Además, algunas de ellas producen sustancias que deterioran las tuberías a largo plazo, ya que liberan agentes oxidantes.

Una de las ventajas más importantes para el ser humano es que sirven como indicadores de contaminación del agua. Si se encuentran cierta cantidad de coliformes (provenientes de las heces humanas) o de bacterias entéricas (que afectan el tracto digestivo), se puede determinar el nivel de contaminación del agua. Algunos tipos de bacterias son: *Escherichia coli* (Figura 1-7), *Vibrio cólera*, *Salmonella typhi* y *Listeria monocytogenes*.

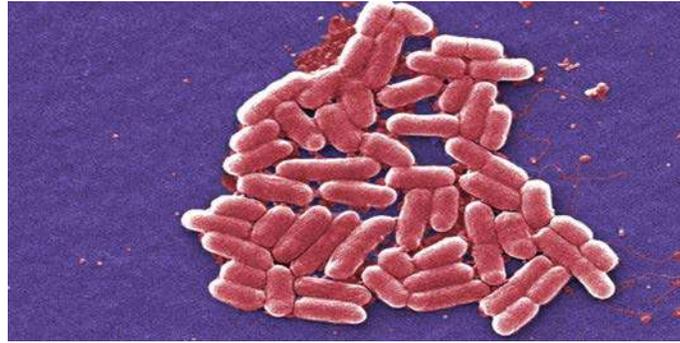


Figura 1-7. Bacteria *Escherichia coli*.

Fuente: <http://www.fotosimagenes.org/imagenes/escherichia-coli-4.jpg>

1.3.1.2 Protozoarios

Generalmente parásitos, son mucho más grandes que las bacterias. Organismos que causan las enfermedades más peligrosas por contaminación de agua, aunque se encuentran con mayor frecuencia en sistemas abiertos: ríos, lagos y lagunas, y en ambientes tropicales como las que se encuentran en el sureste mexicano y Centroamérica. Como son parasitarios, en mayor medida, necesitan encontrar algún organismo hospedero que los transporte a otro que puedan infectar. Necesitan establecerse rápidamente si son transportados por el agua, pero una vez que ingresan al organismo son muy difíciles de destruir. Producen enfermedades como giardiasis, amibiasis y diarreas que pueden ser mortales. Algunos tipos son: *Giardia lamblia* (Figura 1-8), *Cryptosporidium parvum* y *Entamoeba histolytica*.

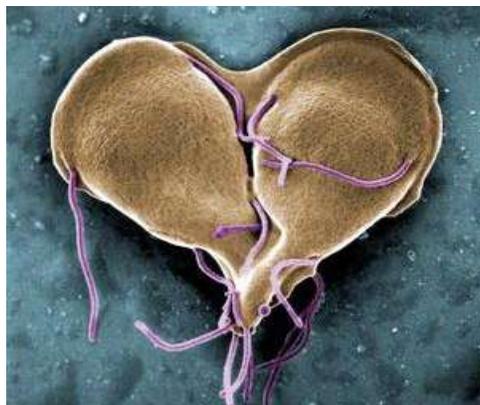


Figura 1-8. Protozario *Giardia lamblia*.

Fuente: <http://eol.org/pages/498214/overview>

1.3.1.3 Algas

Son las menos infecciosas de todos los microorganismos, incluso algunas sirven de alimento para el ser humano. Prácticamente, no causan enfermedades, pero sirven como fuente de nutrientes para muchos protozoarios y animales que sí lo son. Son un marcador natural de contaminación del agua y, a diferencia de las bacterias, pueden ser observadas a simple vista por los colores tan especiales que producen. Pueden dañar las tuberías, ya que les sirven como plataforma para crecer y, como producen algunos compuestos oxidantes, pueden llegar a desgastar las tuberías permitiendo el ingreso de seres vivos que sí son patógenos. *Las clorofitas y las cianobacterias (Figura 1-9)* son tipos de algas que tiñen el agua de color verde.

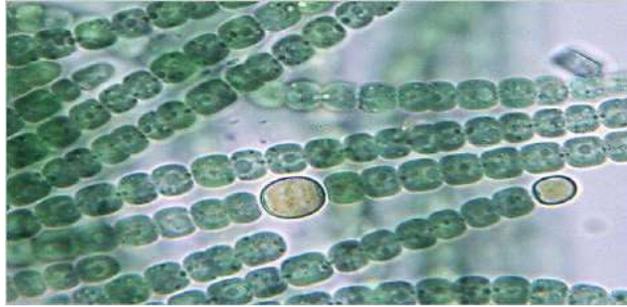


Figura 1-9. Alga Cyanobacterium.

Fuente: <http://www.micrographia.com/specbiol/bacteri/bacter/bact0200/anabae03.jpg>

1.3.1.4 Hongos

Son los menos peligrosos, ya que son muy pocas las especies que utilizan el agua como fuente de dispersión; generalmente lo hacen por el aire. A pesar de esto, los que lo logran suelen ser muy resistentes, ya que liberan esporas que sobreviven a cambios abruptos de las condiciones del medio y algunos poseen organelos que les permiten moverse en el agua. Muchos de ellos son capaces de formar toxinas que, a largo plazo, pueden producir daños al sistema nervioso de los seres humanos; otros, liberan sustancias que dañan los materiales de las tuberías contaminando el agua con otras sustancias y, otros, no producen ningún daño al ser humano, pero sí a las plantas y animales utilizados para la agricultura y la ganadería lo que, de manera indirecta, afecta al ser humano eventualmente. Los *chytridiomycetes (Figura 1-10)* son un tipo de hongos que se dispersan a través del agua.



Figura 1-10. Hongo chytridiomycetes.

Fuente: http://media.eol.org/content/2014/01/21/14/40977_580_360.jpg

1.3.1.5 Animales

Son los más fáciles de combatir por su tamaño. La mayoría son detenidos en el proceso de filtración y es complicado que puedan ingresar nuevamente al sistema, aunque en zonas de tuberías con alta corrosión y bajas presiones pueden ser capaces de ingresar al sistema. Al ser la punta de la pirámide alimenticia, si se eliminan los demás microorganismos es poco probable que se encuentren animales dentro de las redes de agua. A pesar de esto, es posible observarlos en redes muy deterioradas. Algunos tipos de animales son los *platelmintos*, *nematodos* (*gusanos*) (*Figura 1-11*) o *crustáceos pequeños*.



Figura 1-11. Animales tipo Nematodos.

Fuente: http://media.eol.org/content/2012/06/15/21/76591_580_360.jpg

1.3.1.6 Virus

Otro grupo de seres que utilizan las redes de agua potable para esparcirse entre los humanos son los virus. A pesar de que los virus no son considerados como microorganismos, sí son agentes infecciosos que se deben tomar muy en cuenta. Son los principales causantes de epidemias y pueden generar algunas de las enfermedades más peligrosas que hay. Estos son de los entes más complicados de eliminar ya que poseen una especie de coraza muy resistente a los cambios químicos del ambiente, por lo que es necesario tratar el agua con sustancias más potentes y con rayos ultravioleta. Los virus pueden ingresar muy fácilmente a los sistemas de agua porque son aún más pequeños que las bacterias y mucho más resistentes. Son los principales causantes de enfermedades como gastroenteritis (*Figura 1-12*), algunas enfermedades respiratorias e, incluso, la hepatitis A y E.

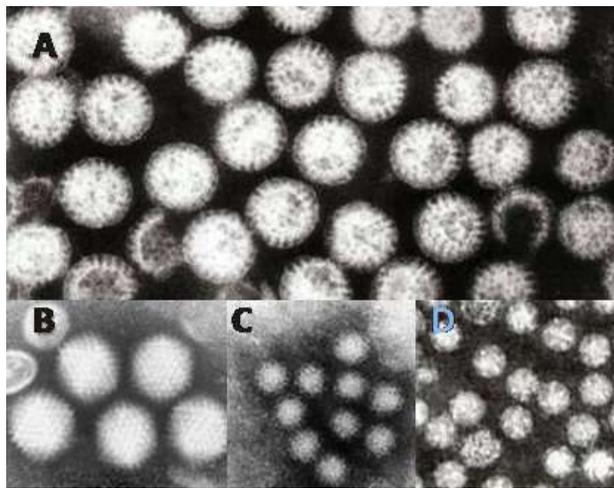


Figura 1-12. Virus gastroenteritis.

Fuente: <http://docsadviceformothers.blogspot.mx/2012/12/viral-gastroenteritis-viral-diarrhea.html>

1.3.1.7 Biofilms

Otro de los problemas importantes que se deben de tomar en cuenta con respecto a la contaminación de las redes de agua por microorganismos es la formación de *biofilms*. Los **biofilms** son agregados de microorganismos que, por la acumulación de ciertos componentes naturales, desarrollan un nicho específico en el cual se pueden proteger de un ambiente que, en principio, sería hostil para ellos. Aun cuando las condiciones en una red de agua potable, con altas presiones de agua y altos niveles de cloro o productos derivados no son un ambiente proclive para la supervivencia de estos organismos, la formación de biofilms les ayuda en gran medida para su protección. En la *Figura 1-13* se muestra el efecto de un biofilm con la bacteria *legionella*.

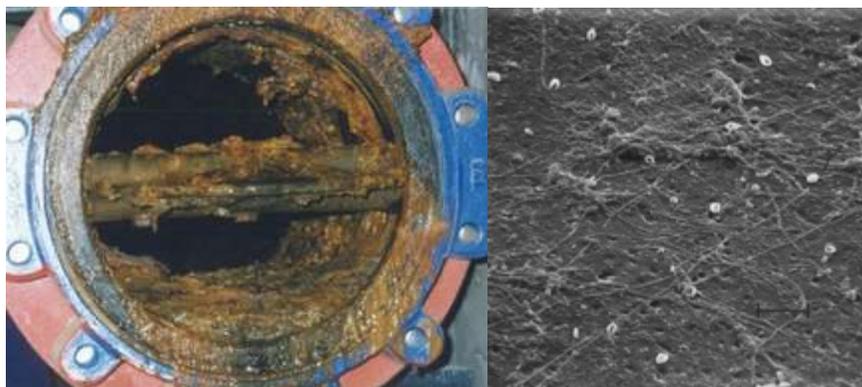


Figura 1-13. Biofilm o biopelícula con la bacteria *legionella*

Fuente: <http://www.google.com.mx/imgres?imgurl=http://www.fortunecity.es/felices/andorra/51/images/legionella%2520-biofilm.jpg>

Los biofilms se forman cuando una gran cantidad de microorganismos (ya sean bacterias, protozoarios u hongos) producen, con ciertos compuestos orgánicos, una capa protectora que los recubre y les permite llevar a cabo sus funciones fisiológicas sin tener que preocuparse por el exterior. Esta capa está formada por, aproximadamente, un 85% de polisacáridos (cadenas largas de azúcares) que forman una matriz extracelular alrededor de las células. La capacidad de formar biofilms es una gran ventaja para los microorganismos implicados, ya que la célula no se encuentra en contacto directo con la corriente de agua. Esto hace que los procesos físicos y químicos que dañarían a las células y terminarían con ellas se vuelvan ineficientes.

A pesar de que este biofilm es muy resistente, puede ser destruido con presiones muy altas o concentraciones de cloro por encima de las recomendadas. Es factible que se utilicen estos métodos para eliminarlos, pero es necesario que se hagan estudios precisos para calcular la cantidad necesaria de presión y de agentes desinfectantes requerido para destruir estas aglomeraciones de microorganismos.

Por otro lado, si todo el biofilm no es extraído por completo, es muy posible que los microorganismos que se encuentren aún con vida puedan reconstruir la pared de polisacáridos y se vuelva a tener el mismo problema meses después. Es de gran importancia conocer y aplicar los métodos para combatir los biofilms de manera completa y, evitar así, que no se vuelvan un problema de mayor escala para los sistemas de agua potable.

1.3.2 Contaminación del agua en la red por sustancias inorgánicas

La eliminación de la contaminación del agua por sustancias inorgánicas como metales, sustancias oxidadas o derivados del amonio, del cloro y del sulfato, es de vital importancia para mantener una calidad del agua en el sistema de abastecimiento agua potable. A diferencia de los microorganismos, las sustancias inorgánicas ingresan al sistema principalmente por errores humanos. Es muy común que el llevar a cabo excavaciones mal planeadas o la construcción de redes de agua mal diseñadas, o con insuficiente mantenimiento, se ocasione la contaminación del agua por componentes inorgánicos. Incluso, algunas sustancias que contaminan el agua pueden derivarse de los materiales con los que las tuberías han sido construidas.

Las sustancias inorgánicas son principalmente de carácter oxidante, ácido o básico, por lo que degradan aún más las tuberías y dañan de manera exponencial la calidad de las mismas, afectando grandes cantidades de agua que, eventualmente, llegarán al consumidor.

Si el agua que es consumida contiene muchas de estas sustancias inorgánicas, se pueden causar enfermedades crónicas e incurables al ser humano, como: cáncer de riñón, hígado, pulmón; daños a la piel, ojos, boca y tejidos internos; daños neuronales y algunos que están asociados a procesos abortivos o a mal formaciones en el desarrollo de bebés.

Es por esto que es de vital importancia deshacerse de estas sustancias y no permitir que se distribuyan a los consumidores en grandes cantidades. Es importante denotar que el agua nunca puede alcanzar una pureza total ante estas sustancias. Siempre existirá cierta cantidad de estas moléculas inmersas en el agua, pero es necesario que estos niveles se mantengan en un nivel mínimo no tóxico para los consumidores.

Algunos de los contaminantes derivados de sustancias inorgánicas más comunes son:

a) *Los ácidos*

Estos son generalmente producidos por la lixiviación y erosión de rocas sulfatadas o nitrificadas. Cuando alguna tubería tiene fugas y se encuentra rodeada por rocas de este tipo, la presión del agua produce un desprendimiento de estos compuestos que ingresarán al sistema de agua cuando disminuya dicha presión.

b) *Las sales*

Las sales se desprenden de las rocas de la misma manera que los ácidos, pero estos poseen una estructura molecular diferente. A pesar de esto, también pueden llegar a ser corrosivos y dañar el cuerpo humano si son ingeridos en altos niveles. Algunos de los compuestos salinos más importantes que se pueden encontrar son los que derivan del cloro. Las sales del ácido cloroso se forman, principalmente, por un inadecuado cálculo de la cantidad de cloro que se debe de agregar al agua al momento de su purificación. Si se coloca en el inicio del sistema una gran cantidad de cloro, está no será capaz de ser disuelta en el agua y se mantendrá en el sistema de agua potable en todo momento. Esto puede provocar que se una a otras sustancias que se encuentran en el agua y así formar sales que dañarán a las tuberías y al cuerpo humano. Además, tanto las sales como los ácidos cambian el sabor del agua, dependiendo de la concentración de los mismos.

c) *Los metales*

Son los compuestos más tóxicos que pueden encontrarse en el sistema de agua potable. Algunos de los más importantes son: arsénico, cobalto, cobre, cadmio, plomo, plata y zinc. Estos se desprenden de las rocas y los metales que pueden ser lixiviados y corroídos por la presión del agua o, más comúnmente, al momento de la reparación de las tuberías y en las excavaciones respectivas. Los metales, una vez que ingresan al sistema y, aún más, cuando se disuelven por completo, son atrapados por las moléculas del agua que las rodean; los metales son entonces muy difíciles de eliminar del sistema. El problema más grande de estos es su alta toxicidad hacia los seres vivos. Los metales, si son consumidos por un ser humano, son capaces de producir cáncer en diferentes órganos y piel; además, han sido relacionados con varios desórdenes mentales y problemas de gestación durante el embarazo. Los metales son los tóxicos inorgánicos de los cuales hay que tener mayor cuidado.

1.3.3 Medidas para conservar la pureza del agua

Es interesante recalcar que la mayor cantidad de problemas implicados en la contaminación del agua, una vez que ha entrado al sistema ya purificada, se deben a cuestiones antropogénicas; es decir, de origen humano. La mayor cantidad de problemas por los que surge esta contaminación del agua es cuestión de una mala manera de diseñar, construir, operar y mantener las redes de tuberías de distribución de agua. Los microorganismos y las sustancias inorgánicas son muy perjudiciales para los humanos y es de vital importancia que se mantengan los niveles necesarios de purificación en todo momento, no sólo en las captaciones y a la salida de las potabilizadoras, sino también en toda la red de distribución del agua.

La calidad del agua potable puede cambiar a medida que se desplaza desde el punto de suministro a los extremos de la red de distribución, dependiendo de los tiempos de tránsito del agua, condiciones físicas de la red, materiales de construcción de las obras, temperatura del agua, cantidad de desinfectante

utilizado, condiciones hidráulicas y características del agua de la fuente natural.

En estas circunstancias, es necesario realizar labores de operación y mantenimiento periódicos con el fin de asegurar la pureza del agua en todo el sistema de distribución. Se recomienda aplicar las siguientes acciones de diseño y operación para controlar la calidad del agua del sistema de agua potable:

a) Mejorar y supervisar el proceso de potabilización y desinfección del agua que se suministra a la red, para prevenir el crecimiento microbiano, la corrosión de tuberías metálicas y la formación de incrustaciones.

b) Optimizar la capacidad hidráulica de las conducciones para evitar largos tiempos de tránsito del agua.

c) Eliminar los puntos de flujo bajo o puntos “muertos” en los circuitos de la red, cambiando la dirección del flujo de agua.

d) Evitar tramos de la red con presión negativa, ya que pueden ingresar al interior de los conductos agua contaminada del suelo, principalmente por las fallas o desperfectos (los modelos de simulación hidráulica son muy útiles para identificar estos tramos de la red).

e) Eliminar el suministro intermitente de agua en el sistema, ya que ingresa agua de mala calidad por las roturas de los conductos, se acelera el proceso de corrosión al dejar con aire los tubos e incrementa la vulnerabilidad estructural de la instalación.

f) Dar mantenimiento periódico a los equipos de bombeo, válvulas y accesorios, pues representan posibles focos de contaminación del agua.

g) Incorporar accesorios que permitan dar mantenimiento a los componentes del sistema sin paro del servicio, como por ejemplo: *by-pass* en macromedidores y válvulas automáticas, puntos de inserción para incorporar cloro en las tuberías, etc.

h) No generar golpes de ariete con movimientos repentinos de válvulas y paros de equipos de bombeo, o bien, instalar equipos protectores como válvulas anticipadoras de onda y cámaras de aire.

i) Cubrir y poner rejillas en los depósitos y tanques de regulación para que no entren insectos, yerbas, polvo y otros contaminantes.

j) Revisar en los tanques y depósitos el decaimiento del cloro, para recargarlo adecuadamente.

k) Inspeccionar la calidad del agua, inmediatamente después de que entra en operación una nueva captación o pozo, o después de que se aíslan sectores de distribución, ya que la mezcla de aguas puede cambiar las características originales o los cambios de flujo alterar la condición anteriormente estable.

Por lo que respecta al mantenimiento y reparación, se recomienda realizar las tareas siguientes:

a) Rehabilitar o reemplazar los componentes viejos y deteriorados del sistema, tales como tubos incrustados o con grandes tubérculos, tanques corroídos o fracturados, equipos de bombeo con fugas, tuberías con aparición recurrente de fugas y válvulas descompuestas.

b) Reparar sellos y superficies deterioradas en el interior de los tanques de regulación, así como su fontanería que se encuentre en mal estado físico. Efectuar también limpiezas periódicas de tanques.

c) Realizar limpieza interna de tuberías, reparar juntas, válvulas y accesorios.

d) Tomar precauciones antes, durante y después de efectuar reparaciones, tales como almacenamiento temporal de tuberías, remoción de escombros dentro de los tubos o instalaciones, limpieza de tuberías y componentes después de su reparación, colocación de baños para el personal, limpieza del sitio, etcétera.

Todas estas actividades de operación y mantenimiento, y muchas más que cada organismo operador implemente, servirán para preservar la pureza del agua en el sistema de abastecimiento y controlar la eficiencia del servicio en la entrega de agua de calidad a sus usuarios. Es importante anotar que el agua purificada debe mantener su grado de pureza en todo su recorrido por el sistema de abastecimiento, por lo que es necesario evitar que entre en contacto con focos contaminantes, protegiendo los tanques de almacenamiento, reduciendo las fugas y rehabilitando las tuberías y accesorios con deterioro interno.

1.4 AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El sistema de agua potable está ligado estrechamente al uso de energía eléctrica. En particular, los equipos de bombeo de pozos y estaciones de rebombeo demandan grandes cantidades de energía eléctrica, de ahí la gran importancia que tiene conocer las características y funcionamiento de esta infraestructura, aunado a las tarifas del costo energético vigentes.

Para el caso de México, el 63.8 % del agua que abastece a los sistemas de agua potable es de origen subterráneo, tiene que ser extraída mediante equipos de bombeo e impulsada por bombeo a diferentes elevaciones y partes de las ciudades. Se ha reportado que de manera global se consumen aproximadamente 3,771 gigawatts-hora por año (*Ref. 1.2*).

Dependiendo de diversos factores, cada etapa del proceso del sistema de agua potable impacta sobre el consumo energético de manera diferente. En el *cuadro 1.1* se expone una descripción de las obras del sistema de abastecimiento de agua potable, con el impacto relativo típico basado en rangos y algunos de los factores que influyen en dicho consumo de energía eléctrica.

El uso continuo de los equipos de bombeo y de sus instalaciones eléctricas sufren desgastes con el tiempo, haciendo que su eficiencia disminuya por debajo de las indicaciones de las normas. El mantenimiento constante y preventivo de estos equipos favorece el ahorro de energía y disminuye los costos correspondientes.

Es por esta razón que el organismo operador debe programar actividades de diagnóstico y revisión de manera frecuente, para tener control de la eficiencia electromecánica de los equipos de bombeo, motores, conexiones y aparatos eléctricos. El diagnóstico se realiza siguiendo las especificaciones de las normas oficiales mexicanas siguientes:

NOM-001-ENER-2014: Eficiencia energética de bombas verticales tipo turbina con motor externo eléctrico vertical. (*Sustituye NOM-001-ENER-2000*).

NOM-006-ENER-2015: Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. *(Sustituye NOM-006-ENER-1995).*

NOM-010-ENER-2004: Eficiencia energética del conjunto motor bomba sumergible tipo pozo profundo.

En este sentido, los valores mínimos que deben cumplir los equipos de bombeo para pozo profundo, según la norma oficial NOM-006, se muestran en el *Cuadro 1-2*. En otro tipo de bombeo los valores de eficiencia mínimos se consultan en las normas respectivas.

Cuadro 1-1. Procesos del sistema de agua potable y su impacto típico en el consumo de la energía eléctrica (Ref. 1.2).

Obra	Proceso	Descripción básica	Impacto típico sobre el consumo global de energía (%)	Observaciones importantes sobre el consumo energético
Captación	Extracción de Pozo profundo.	Extraer el agua a la superficie bombeando el agua cruda desde el nivel dinámico de un pozo profundo.	30-60	El consumo energético depende de la profundidad del pozo. Los niveles de abatimiento anual de una fuente sobreexplotada afectan sustancialmente este consumo.
	Captación de fuente superficial.	Captar el agua cruda de una toma de río, manantial u otra fuente superficial y bombearla a la planta potabilizadora.	0-10	Este consumo energético es relativamente menor que la extracción de pozo profundo. Los índices energéticos de estas captaciones, en (kilowatts-hora/m ³), son significativamente menores que en el caso de extracción de pozo profundo.
Purificación	Desinfección.	Implica la dosificación de cloro o algún otro proceso como la ozonación, para lograr los niveles de desinfección requeridos por las normas de calidad de agua.	1-2	Esta operación y el consumo energético de la dosificación, generalmente, están cuantificados en la potabilización o en el bombeo de la extracción de agua de los pozos profundos.

Obra	Proceso	Descripción básica	Impacto típico sobre el consumo global de energía (%)	Observaciones importantes sobre el consumo energético
	Potabilización	Implica el procesamiento del agua cruda en una Planta de tratamiento primario o secundario.	5-10	Generalmente, está ligada a las obras de toma de fuentes superficiales que pueden contener un nivel significativo de contaminación orgánica y otro tipo de contaminantes.
Conducción	Envío del agua potable a la red de distribución.	Bombeo del agua potable de las plantas potabilizadoras a tanques de regularización o directamente a la red.	0 - 40	En algunos casos particulares esta operación se realiza por gravedad, lo que implica nulo consumo energético. En casos donde predominan las fuentes superficiales puede ser muy alto su impacto sobre el consumo global, mayoritariamente si son a base de sistemas de bombeo.
Distribución	Almacenamiento.	Implica la operación y el mantenimiento de los tanques y cárcamos de almacenamiento incluidos en el sistema.	NA	La magnitud del consumo energético en esta operación depende de las características topográficas de la ciudad, del diseño original de la red y de la planeación para crecimientos a futuro.
	Rebombeo.	Bombeo a zonas de mayor altura desde los tanques de regularización, cárcamos de almacenamiento o directamente de la red.	5-35	

Cuadro 1-2. Valor mínimo de eficiencia electromecánica de equipos de bombeo, especificados en las NOM-006-ENER-2015.

Intervalo de potencias		Eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba (%)	
Kilowatts	HP	Bomba con motor sumergible	Bomba con motor externo
5.9 - 14.9	7.5 - 20	35	52
15.7 - 37.3	21 - 50	47	56
38.0 - 93.3	51 - 125	57	60
94.0 - 261.0	126 - 350	59	64

Los principales elementos para el suministro y transformación energética, que deben ser revisados periódicamente, se muestran esquemáticamente en la *Figura 1-14*, donde se observa la cadena de equipos involucrados, desde el suministrador de energía, pasando por el transformador, centro de control del motor, motor eléctrico, bombas, hasta la disposición final del agua potable y residual. Asimismo, se muestra que en cada uno de estos elementos existen pérdidas de energía debido a factores como desgaste y transformación de energía.

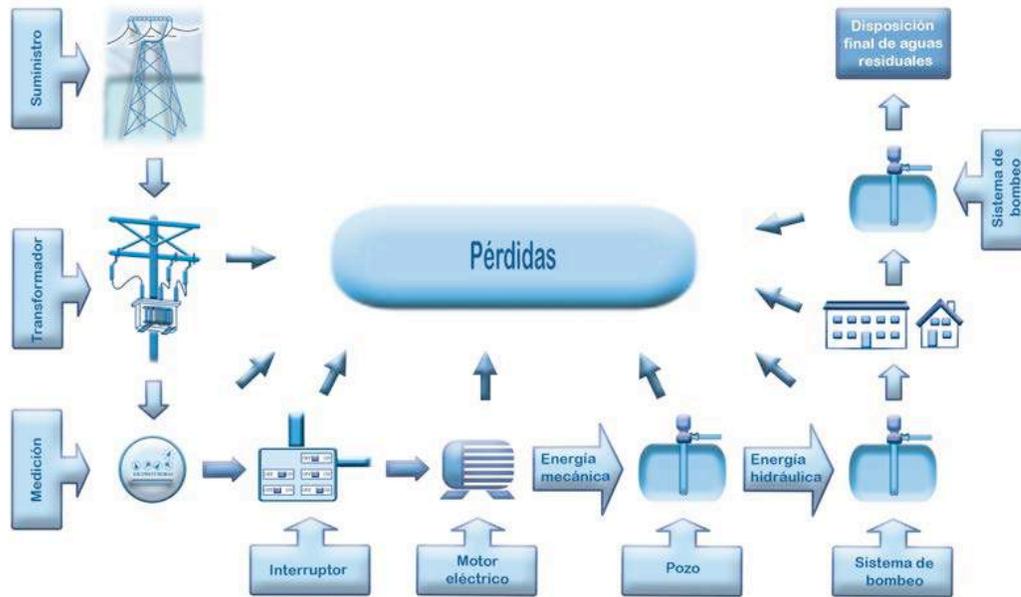


Figura 1-14. Sistema Típico de Suministro y Consumo Energético en Sistemas de Agua Potable y Saneamiento.

Con los resultados del diagnóstico, se procede a realizar las reparaciones y cambios necesarios para que los equipos de bombeo funcionen nuevamente dentro de los rangos permisibles de eficiencia. Las reparaciones pueden ser desde simple limpieza y ajuste de piezas, hasta el cambio total de los equipos e instalaciones; algunas de las tareas son las siguientes:

a) Mantenimiento preventivo

- Corrección de vibraciones de equipos.
- Verificación de niveles de aceites y agua.
- Desmontaje del equipo, lavado y chequeo de piezas.
- Alineamiento de ejes, chequeo de empaques y bujes.
- Instalación de capacitores.
- Instalación de variadores de velocidad.
- Cambio de cableado.
- Aseguramiento de conexiones a tierra.
- Aplicación de pintura.

b) Mantenimiento correctivo

- Corrección del sentido de giro de bomba.
- Cambio de impulsores.
- Cambio de capacitores.
- Cambio de anillos, bujes y cojinetes.
- Rectificación del eje.
- Rebobinado de motor.
- Cambio de transformador.
- Cambio de bomba.
- Renovación del tren de descarga.

Como en todo proceso, siempre existirán situaciones de emergencia en los equipos de bombeo e instalaciones eléctricas, por lo que es recomendable disponer en almacén de repuestos de piezas mecánicas y eléctricas, incluso equipos de bombeo completos para reemplazo.

En México, en equipos de bombeo de sistemas de agua potable públicos se aplican las siguientes tarifas, a partir del 1 de diciembre de 2017:

- PDBT: Pequeña demanda (hasta 25 kw-mes) Baja Tensión (antes tarifa 6).
- GDBT: Gran demanda (mayor a 25 kw-mes) en Baja Tensión (antes tarifa 6).
- GDMTH: Gran demanda en media tensión horaria (antes tarifa HM, HMC, 6).
- GDMTO: Gran demanda en media tensión ordinaria (antes tarifa OM, 6).

Dentro de estas tarifas además de incluirse los cargos fijos y variables sobre el consumo de energía, también se añaden los siguientes cargos variables:

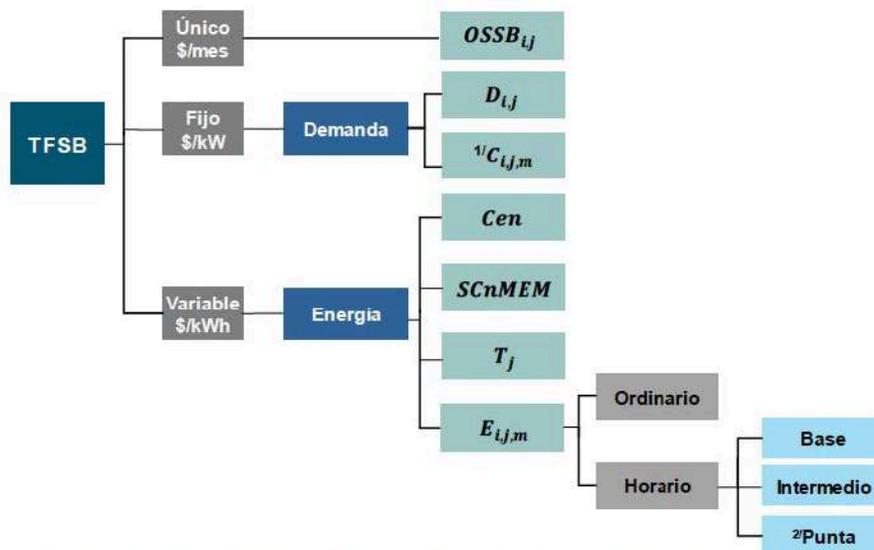
- distribución,
- transmisión,
- operación del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE),
- operación del suministrador de servicios básicos,
- servicios no conexos al Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) y
- capacidad demandada.

Con el objeto de reflejar el costo real del servicio, la Comisión Federal de electricidad (CFE), en México, considera diferentes regiones en los costos del suministro de energía eléctrica. Estos cargos normalmente son publicados por la CFE en su página de Internet. En la *Figura 1-15* se muestran las regiones tarifarias del país. En cada una de las categorías tarifarias se definen cargos únicos (por usuario), cargos fijos (por demanda) y cargos variables (por energía), que reflejan la naturaleza del costo en cada componente de las TFSB y que se adaptan a las características de consumo y medición de cada usuario.

Una gestión integrada de la infraestructura de bombeo de agua potable debe estar conformada por tres actividades: a) actualización continua del catastro de la infraestructura electromecánica en operación, b) registro y monitoreo de las estadísticas de consumo y facturación, y c) medición y evaluación periódica de eficiencias electromecánicas. Las primeras dos son actividades que deben tener una continuidad permanente y la tercera es una actividad que debe ser programada y ejecutada periódicamente al menos una vez al año.



Cargos de las tarifas finales de suministro básico



¹⁷ En función del tipo de medición del usuario. ²¹ El cargo de semipunta se aplica únicamente en la división de Baja California. Fuente: Elaboración propia CRE.

Figura 1-15. Regiones tarifarias y cargos de las tarifas por energía, CFE.

Fuente: <http://www.cfe.gob.mx/negocio/conocetarifa/Paginas/Tarifas.aspx>

En diversas ciudades del país se han realizado las evaluaciones para emprender un programa integral de uso eficiente de energía en sistemas electromecánicos, las cuales han arrojado atractivos niveles de ahorros potenciales. Entonces, un programa integral de uso eficiente de energía en sistemas electromecánicos debe ser visto, por el personal directivo de los organismos operadores de agua potable del país, como una oportunidad objetiva para emprender sus propias evaluaciones y programas.

En forma general, este programa integral de uso eficiente de energía eléctrica está conformado por medidas de ahorro de energía de aplicación en el corto plazo y por medidas de ahorro de aplicación en el mediano plazo. Las medidas de ahorro de energía de corto plazo son aquellas que pueden ser ejecutadas directamente en el sistema electromecánico y, para ser implementadas, no se requieren modificaciones a la red ni en la operación del sistema hidráulico. En esta categoría se encuentran: rehabilitación con equipos de alta eficiencia, optimización del factor de potencia y adecuación de tarifas. En esta última acción no hay ahorro de energía, solo disminución de costos. Los ahorros potenciales de energía en el mediano plazo se calculan y evalúan con base en las modificaciones diseñadas en los proyectos ejecutivos de mejora en las eficiencias física e hidráulica (conocidos genéricamente como sectorización de redes de distribución). Ello implica que, para ser implementadas, se deben cumplir las condiciones físicas y de operación de la red diseñadas en tales proyectos. Se identifican tres medidas (*Cuadro 1-3*).

Cuadro 1-3. Medidas de ahorro de energía eléctrica de mediano plazo en equipos de bombeo.

Medida de ahorro	Marco de referencia	Descripción
1) Sustitución por equipos de alta eficiencia.	Optimización de la operación de la red.	Sustitución de equipos de alta eficiencia en condiciones de red de distribución optimizada (sectorizada), con gestión adecuada de presiones y caudales.
2) Uso de variadores de frecuencia.	Optimización de la operación de pozos.	Instalación de variador de frecuencia en pozo con inyección directa a la red.
3) Paro en hora punta.	Optimización de la operación de tanques de regulación.	Paro en hora punta de equipos de bombeo que suministran agua a un tanque de regulación, con capacidad suficiente para abastecer de agua a la población durante dicho paro.

NOTA: El uso de los variadores de velocidad, como tal, puede considerarse también una medida de ahorro de energía de corto plazo.

La experiencia en diversos organismos operadores de México indica que el reto del personal directivo y de operación es mantener vigente y actualizada la información registrada en el catastro inicial. En estricto sentido, se debe realizar una primera vez el levantamiento de datos y en lo subsecuente la actualización debe darse continua y permanentemente. En otras palabras, el catastro de la infraestructura de bombeo y el registro de estadísticas de consumo y facturación deben trascender al cambio de administraciones.

Aquel organismo operador que, con el pasar de los años y/o cambio de administraciones requiera una nueva campaña de levantamiento de datos, estará evidenciando que en algún momento la gestión y operación de esta infraestructura dejó de ser la adecuada. Esta situación no debe menospreciarse, pues es seguro que el organismo operador este expuesto a tener que pagar costos de operación que pudiesen ser evitados.

1.5 REHABILITACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA

Toda infraestructura de un sistema de agua potable tiene una vida útil que, llegada a su fin, provoca riesgos importantes a la salud, a las condiciones hidráulicas y a las condiciones estructurales de las obras,

lo que puede llegar a repercutir en un deficiente servicio de agua para los usuarios. Las tuberías, válvulas, tanques, bombas y accesorios en mal estado ocasionan altos costos de mantenimiento al organismo operador, por lo que resulta más rentable proceder a su sustitución o rehabilitación, antes que seguir reparando (Figura 1-16).



Figura 1-16. Tubería rehabilitada por desgaste interno.

Por consiguiente, es necesario que se realice un estudio completo del estado físico general de la infraestructura hidráulica del sistema de agua potable al menos cada cinco años, con la finalidad de determinar qué obras de la red han cumplido con su vida útil y proceder a evaluar la posibilidad de realizar la renovación o rehabilitación de algunos de sus elementos. En el caso de las tuberías de la red de distribución se requieren estudios especiales, ya que se encuentran ocultas bajo el suelo.

Aunque los conceptos de rehabilitación y de renovación son fácilmente comprensibles, surge con frecuencia confusión entre el significado de los mismos. Por renovación se entiende, en general, la acción de sustituir una cosa vieja, o que ya ha servido, por otra nueva de la misma clase. Mientras que por rehabilitar se entiende habilitarla de nuevo o restituirla a su antiguo estado. Por eso, términos como reparar, restituir, arreglar, etc., se refieren al concepto de rehabilitación; mientras que otros términos como cambiar, sustituir, reponer se refieren al concepto de renovación.

Actualmente, el grado de deterioro de una tubería se mide principalmente en función del número de fallas ocurridas por kilómetro de tubería en un período. Por ejemplo, la *Water Services Regulation Authority* (antes OFWAT), de Inglaterra, indica la siguiente clasificación:

Cuadro 1-4. Clasificación del nivel de deterioro de tuberías, según la OFWAT.

Índice	Comportamiento	Distancia entre número de fallas
1	Excelente	Superior a 1 km
2	Bueno	Entre 0.5 a 1 km
3	Regular	0.25 a 0.5 km
4	Malo	0.125 a 0.25 km
5	Inaceptable	hasta 0.125

Son tres las causas fundamentales por las que se recomienda la rehabilitación o renovación de una serie de tuberías en una red de distribución de agua: 1) insuficiencia sanitaria del agua, 2) insuficiencia volumétrica del agua y, 3) insuficiencia hidráulica. De estas tres razones, la primera es la más importante y la que provoca la urgencia de ejecutar esta acción por parte del organismo operador. Las dos restantes

representan un problema operacional y, aunque también son muy importantes, no suponen un caso tan grave de tanta repercusión como el problema de la calidad del agua.

Existen varios métodos para la toma de la decisión de efectuar el reemplazo o la rehabilitación de tuberías, que van desde los meramente descriptivos para definir el estado actual, hasta los predictivos, con los que se estima el tiempo físico del reemplazo o rehabilitación, y los que incluyen la evaluación económica para incluir los costos. La aplicación de estas técnicas requiere de muchos análisis especializados, por lo que se requerirá de apoyo externo para llevarlos a cabo.

Con los modelos Descriptivo y Predictivo se realizan diagnósticos estadísticos de la ocurrencia de fallas, para decidir qué zona de la red debe ser rehabilitada o renovada.

Uno de los modelos más utilizados es el Modelo Económico, que se aplica a una tubería o a un grupo de tuberías de iguales características; es decir, de un mismo diámetro, con niveles similares de deterioro, de igual material, etc. El método se basa en comparar los costos de renovar o rehabilitar las tuberías en valor presente, contra el costo de continuar reparándolas. Con el resultado se determina el tiempo en que conviene realizar su renovación o rehabilitación. Hay modelos económicos publicados, como el desarrollado por Walski T (Ref. 1.4), o el que propone Pardo, Cabrera y Cobacho (Ref. 1.5).

Walski propone sumar los costos de renovación y mantenimiento (reparación) en valor presente, para obtener el tiempo óptimo en el cual resulta más barato rehabilitar o sustituir la tubería que seguirla reparando (Figura 1-17). Es necesario, en este modelo económico, determinar la frecuencia de fallas en el tiempo, con base en datos estadísticos históricos de ocurrencia de fallas en las tuberías.

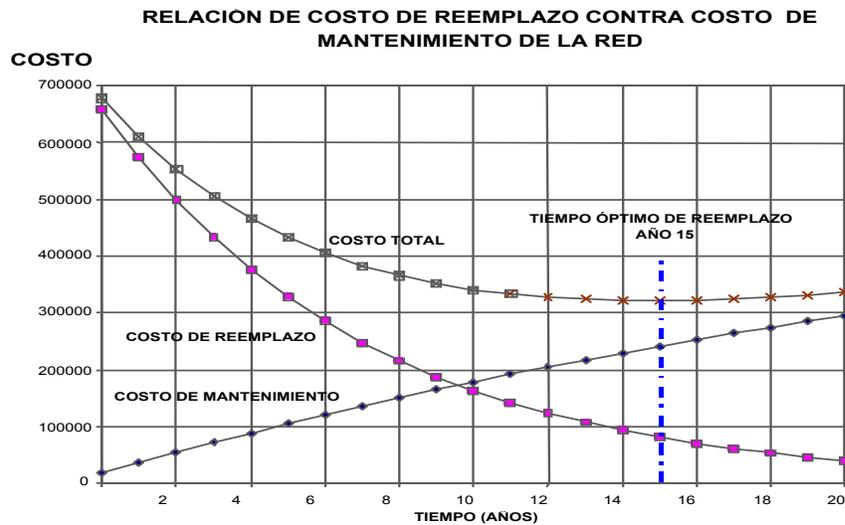


Figura 1-17. Modelo económico de Walski para elegir el período óptimo de rehabilitación o renovación de tuberías.

Pardo, Cabrera y Cobacho proponen sumar a los costos de renovación y reparación, otros tres costos asociados al costo del agua fugada, costo social y costo de oportunidad, para precisar mejor el tiempo óptimo de rehabilitación o renovación. (Figura 1-18).

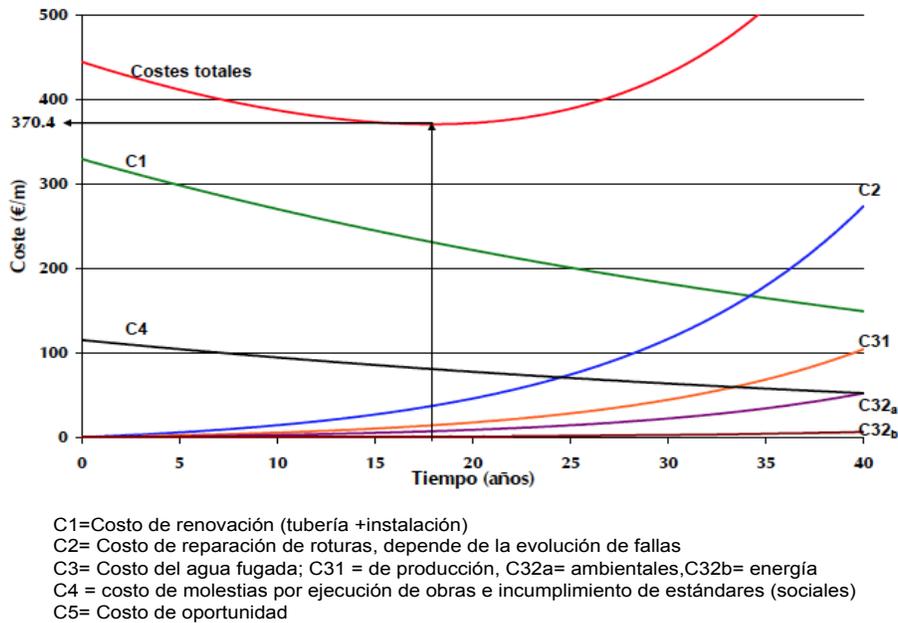


Figura 1-18. Método de Pardo, Cabrera y Cobacho para elegir el período óptimo de rehabilitación o renovación de tuberías.

Independientemente de los resultados de la aplicación de modelos descriptivos, predictivos y económicos, el organismo operador deberá realizar un programa de rehabilitación o renovación continua de la infraestructura de la red de distribución, de manera sistemática desde las tuberías más antiguas (normalmente instaladas en las zonas del centro de las ciudades) hacia la periferia, asignando recursos anuales para esta tarea.

La rehabilitación o renovación de una tubería a cielo abierto causa afectaciones al tráfico, a los otros servicios y a los usuarios del sistema de agua potable. Esta técnica constructiva es sencilla y la puede ejecutar el personal del organismo operador, hasta un cierto diámetro de conducción. En la actualidad, existen técnicas modernas de rehabilitación y renovación de tuberías enterradas sin realizar zanja, clasificadas como se muestra en la *Figura 1-19*, que es importante tomar en consideración, ya que causan menos molestias y tienen rendimientos más altos; algunas de estas tecnologías se muestran en la *Figura 1-20*.

Es importante mencionar que no resulta rentable que los organismos operadores pequeños y medianos compren los equipos asociados a alguna de estas técnicas. Es preferible que contrate los servicios de las empresas dedicadas a estas actividades, dado que se trata de tecnología especializada, que no podría sostener ni disponer de estos equipos de manera permanente.

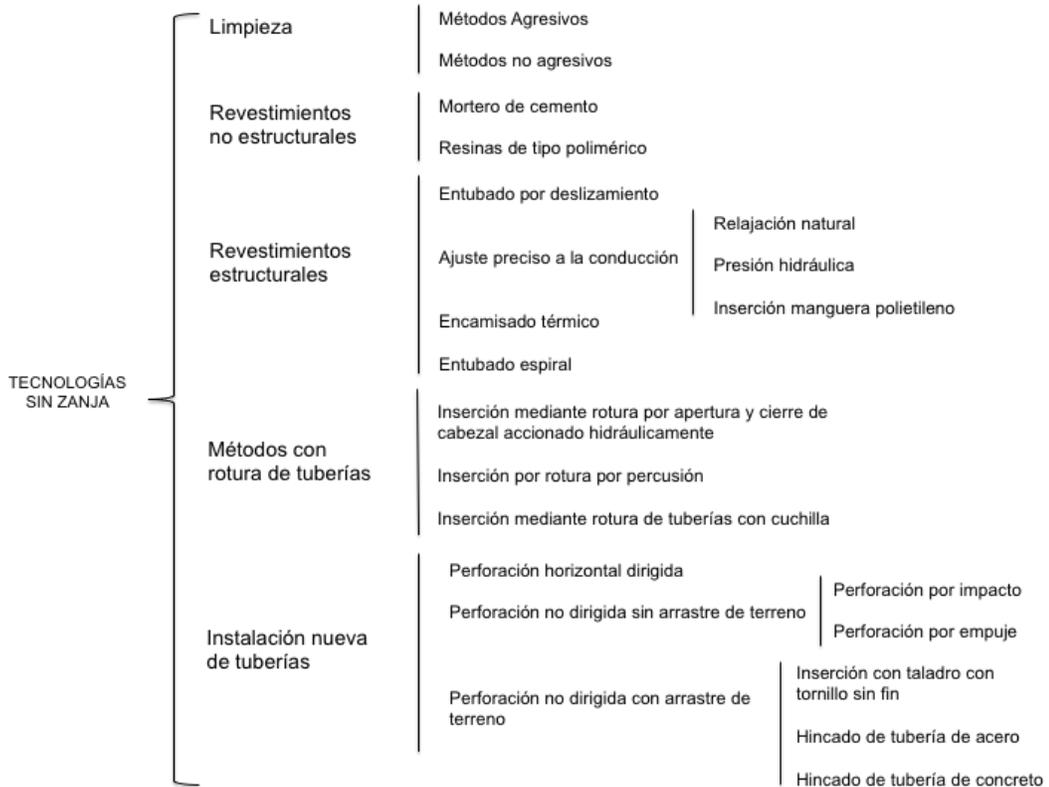


Figura 1-19. Clasificación de técnicas para rehabilitar y renovar tuberías sin hacer zanja.

Fuente: Pardo P.M., Cabrera M. E. y Cobacho J.R, Ref. 1.5.



Figura 1-20. Tecnologías para rehabilitar y renovar tuberías sin hacer zanja.

Fuente: Pardo P.M., Cabrera M. E. y Cobacho J.R, Ref. 1.5.

1.6 PREVENCIÓN DE RIESGOS ANTE EVENTOS NATURALES EXTREMOS

Toda la infraestructura de un sistema de abastecimiento de agua potable debe ser proyectada tomando en consideración las amenazas naturales del área en la cual se encuentra ubicado. Muchos de los problemas que se han presentado en los sistemas a causa de fenómenos naturales son debidos a que dichos fenómenos no se consideraron en la etapa de concepción, diseño, construcción y operación del sistema.

Los eventos que más impacto tienen en el sistema de agua potable son las lluvias extremas y la sequía. En el primer caso, el sistema se vuelve vulnerable porque el agua de las fuentes de abastecimiento pierde calidad, las corrientes arrastran las conducciones, inundan las instalaciones y provocan que el servicio de energía eléctrica se suspenda. En la sequía, las fuentes de abastecimiento de agua disminuyen su capacidad notablemente, aumentan las necesidades de consumo de agua en la población y se incrementa de la demanda de energía eléctrica.

Los usuarios domésticos no perciben la sequía en los sistemas de agua potable de las ciudades mexicanas, a menos que será muy prolongada e intensa. Están acostumbrados a la escasez; de ahí el uso de cisternas y tinacos. Entre otras causas, se debe a la gestión deficiente del organismo operador y al deterioro e incapacidad de la infraestructura de abastecimiento de agua. En condiciones de sequía, los operadores interrumpen con mayor frecuencia el servicio y reducen las horas de suministro; sin embargo, es recomendable mejor recurrir al racionamiento de agua: fijar consumos, restringir los usos no elementales e inducir el ahorro con dispositivos ahorradores.

Cuando suceden lluvias extremas se supondría que ocurriría lo contrario a la sequía; no obstante, esto no es así, puesto que la infraestructura falla muchas veces debido a que no está condicionada para resistir el embate de las corrientes. Asimismo, varias instalaciones de bombeo se ubican en lugares que se inundan a un grado tal que se ven obligadas a detener su funcionamiento. En el caso de las plantas de tratamiento se incrementa la turbiedad del agua y se vuelven ineficientes. Esto, por supuesto, ocasiona la suspensión del servicio de agua a los usuarios por períodos prolongados, con el riesgo de afectar la salud humana.

Un sistema moderno de agua potable debe suministrarla sin interrupción, calidad y cantidad suficiente, y a la presión requerida. Durante la sequía y lluvia extrema es imprescindible el control del agua disponible a través de un plan de mitigación y emergencia.

El plan de mitigación y emergencia en desastres naturales se fundamenta en el mejor conocimiento posible de la vulnerabilidad del sistema, en cuanto a:

- Deficiencias en su capacidad de prestación de servicios u operatividad.
- Debilidades físicas de los componentes ante las sollicitaciones externas.
- Debilidades de organización ante las eventuales emergencias que se puedan ocasionar.

Si bien reducir esta vulnerabilidad puede incrementar el costo de instalación del sistema de abastecimiento de agua potable, dicho incremento es menor cuando se compara con los gastos necesarios para reparar los daños, la provisión de agua segura durante la emergencia y los demás perjuicios que causa la interrupción de los servicios, sobre todo en la salud de las personas.

Las amenazas naturales pueden clasificarse en dos grandes tipos: geológicas y meteorológicas. En

la región, los principales fenómenos de origen geológico son los sismos, los deslizamientos y las erupciones volcánicas; mientras que los fenómenos meteorológicos más comunes son las lluvias intensas, las inundaciones y los huracanes. En la *Figura 1-21* se muestra una clasificación de los impactos que trae consigo un desastre natural al sistema de agua potable.

Fenómeno		Sismos	Deslizamientos	Erupciones volcánicas	Inundaciones	Huracanes
Componente	Fuentes de agua	<ul style="list-style-type: none"> Reducción del afloramiento. Desvío del manantial. 	<ul style="list-style-type: none"> Desvío del manantial. 	<ul style="list-style-type: none"> Cambio en la calidad de la fuente. 	<ul style="list-style-type: none"> Contaminación del agua en los pozos por ingreso de lodo. 	<ul style="list-style-type: none"> Lluvias intensas pueden desviar el manantial.
		<ul style="list-style-type: none"> Cambio en la calidad por deslizamientos inducidos. 	<ul style="list-style-type: none"> Cambio de la calidad del agua por el aumento de sólidos. 	<ul style="list-style-type: none"> Alteración de la calidad del agua por caída de cenizas. 	<ul style="list-style-type: none"> Alteración de la calidad del agua por el aumento de sólidos. 	<ul style="list-style-type: none"> Alteración de la calidad de agua por el aumento de sólidos.
	De manantial	<ul style="list-style-type: none"> Fisuras y filtraciones; colapso de la unidad. Daños en la estructura debido a la licuefacción. 	<ul style="list-style-type: none"> Azolve de la unidad. Colapso total de la estructura. 	<ul style="list-style-type: none"> Azolve y colapso de la unidad por deslizamientos, lahares y demás material volcánico. 	<ul style="list-style-type: none"> Daños o colapso de la unidad por asentamientos de terreno o deslizamientos. 	<ul style="list-style-type: none"> Azolve de la unidad debido a los deslizamientos.
	Obra de toma en río	<ul style="list-style-type: none"> Fisuras y filtraciones. 	<ul style="list-style-type: none"> Azolve de la presa por el incremento de sólidos. Colapso total de la unidad. 	<ul style="list-style-type: none"> Azolve y colapso de la unidad debido a deslizamientos, lahares y demás material volcánico. 	<ul style="list-style-type: none"> Daños o colapso de la unidad por asentamientos de terreno o deslizamientos. 	<ul style="list-style-type: none"> Daños en obras de toma por erosión de riberas del río.
	Pozos	<ul style="list-style-type: none"> Fisuras y filtraciones. Colapso del pozo. 	<ul style="list-style-type: none"> Azolve del pozo por ingreso de sólidos. Colapso del pozo. 	<ul style="list-style-type: none"> Daños en bombas y componentes metálicos por acción de las cenizas. 	<ul style="list-style-type: none"> Azolve del pozo por ingreso de sólidos. Daños por asentamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> Daños en pozos cercanos a ríos por erosión de riberas.
	Tuberías ¹	<ul style="list-style-type: none"> Caída de rocas sobre tuberías expuestas o poco profundas. Rotura de tuberías por asentamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> Daños y roturas en tuberías instaladas en laderas o cauces. Daño en tuberías por deslizamiento de terreno. 	<ul style="list-style-type: none"> Daños y roturas en tuberías instaladas en laderas o cauces. 	<ul style="list-style-type: none"> Rotura de tuberías por asentamiento del terreno. Ingreso de agua contaminada. 	<ul style="list-style-type: none"> Daños en cruces elevado por aumento de caudal, deslizamientos y erosión de riberas.
	Reservorio y otras unidades complementarias	<ul style="list-style-type: none"> Fisuras, filtraciones y daños por asentamiento de terreno. Pérdida del agua almacenada. 	<ul style="list-style-type: none"> Azolve de unidades, erosión y asentamiento del terreno. Colapso de la unidad. 	<ul style="list-style-type: none"> Azolve de unidades. Alteración en la calidad del agua en unidades descubiertas. 	<ul style="list-style-type: none"> Azolve de unidad, asentamiento del terreno. Contaminación por ingreso de lodo. 	<ul style="list-style-type: none"> Daños en techos de algunos reservorios por vientos fuertes. Daños asociados a deslizamientos y lluvias torrenciales. Daños por la caída de árboles sobre las estructuras.
	Equipos de bombeo y otros componentes eléctricos	<ul style="list-style-type: none"> Corte de fluido eléctrico. Pérdida de alineación en bombas. 	<ul style="list-style-type: none"> Daños en las cassetes de bombeo ubicadas en zonas vulnerables. 	<ul style="list-style-type: none"> Daño en componentes metálicos por la acción generada por las cenizas. 	<ul style="list-style-type: none"> Daños en bombas y equipos eléctricos. 	<ul style="list-style-type: none"> Daños asociados a lluvias intensas e inundaciones.

¹ Se refiere a las tuberías que forman parte de las líneas de conducción, bombeo y aducción.

Figura 1-21. Impactos de fenómenos naturales en sistemas de abastecimiento de agua potable.

Fuente: Manuales y guías sobre desastres, OPS, 2007.

La Comisión Nacional del Agua (Conagua) ha publicado en el año 2008 un manual de lineamientos de acciones contra fenómenos hidrometeorológicos (*Ref. 1.6*), donde expone recomendaciones prácticas para los organismos operadores sobre qué hacer antes, durante y después de un huracán.

Los impactos de los fenómenos naturales sobre los sistemas de abastecimiento de agua suelen repetirse en condiciones similares y presentan características comunes que pueden ser agrupadas en patrones de daño. Estos daños dependen del componente afectado, la naturaleza de los fenómenos naturales y las vulnerabilidades del sistema.

Considerando estas características, se pueden tomar medidas para reducir la vulnerabilidad y favorecer la sostenibilidad de los servicios de agua. Por lo tanto, se deben evaluar las amenazas y vulnerabilidades y, con el resultado, programar las acciones de prevención para disminuir los riesgos correspondientes. Para esto, se deben responder las siguientes preguntas:

a) Amenazas:

¿Qué amenazas se podrían presentar en la zona?

¿Dónde se originan y qué área se ve afectada?

¿En qué época del año ocurren y con qué frecuencia?

¿Cuál es la magnitud de los daños?

¿Qué antecedentes se tienen?

¿Qué otros peligros pueden generarse?

b) Vulnerabilidad:

¿Dónde se encuentran ubicados los componentes del sistema?

¿Cuáles son las características del terreno?

¿De qué materiales está construido y cuál es el estado de conservación de los componentes?

¿Quién está encargado de la operación y mantenimiento del componente?

¿Quién tiene la responsabilidad de restablecer el servicio cuando éste se afecta?

¿Con qué recursos y capacidades se cuenta para la rehabilitación del componente en caso de que resultara afectado?

¿Qué interrelación existe con instituciones de gubernamentales en caso de desastre?

En función de las respuestas, se elaborará un programa de mantenimiento y operación ante emergencias por desastres naturales, donde quedará asentado la participación específica de cada área del organismo operador, la disposición de recursos y materiales, la atención temporal del servicio de agua a

los usuarios y la coordinación con entidades externas. El programa deberá revisarse y actualizarse cada año.

1.7 EL RETO DE LA INGENIERÍA DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA

Hoy en día, los sistemas de agua potable exigen eficiencia. Su construcción y operación deben enfocarse hacia la conservación del medio ambiente, especialmente al ahorro de agua y energía, siempre cumpliendo con su objetivo primordial: preservar la salud del ser humano.

Esto no resulta fácil de conseguir dada la multiplicidad de factores técnicos, sociales, económicos, geográficos y políticos de su entorno.

Generalmente, las poblaciones cuentan con un sistema de abastecimiento de agua potable, que se ha venido construyendo y operando a lo largo de muchos años. Por consiguiente, es común que la mayoría de los proyectos de ingeniería sean de rehabilitación, ampliación y/o modernización.

En estas condiciones, antes de construir, rehabilitar, ampliar o modernizar infraestructura en el sistema de abastecimiento de agua potable, es muy importante considerar la elaboración de un diagnóstico del sistema, que incluya: una evaluación del estado físico de la infraestructura existente y su funcionamiento hidráulico; la determinación de la disponibilidad espacial y temporal y aprovechamiento del agua; el estudio de las eficiencias volumétrica, hidráulica, electromecánica y de la calidad del agua; el análisis de la problemática técnica, social y económica del lugar; el análisis de la rentabilidad del proyecto a ejecutar y el origen de su financiamiento; y el estudio del impacto ambiental que provocará la implementación estas acciones.

Con los resultados del diagnóstico, se tomarán las previsiones necesarias para que las acciones a ejecutar realmente cumplan sus objetivos y queden inmersas dentro de la dinámica operacional existente y contribuyan al mejoramiento del servicio de agua potable de la localidad en cuestión.

En este sentido, el reto de la ingeniería consiste, principalmente, en saber establecer las acciones y estrategias que impactan más rápidamente y con la mayor rentabilidad en el incremento de la eficiencia del sistema de abastecimiento de agua potable, sin deteriorar el medio ambiente del entorno, ni perjudicar el nivel de la calidad del servicio a los usuarios que ya cuentan con él, y sin resquebrajar financieramente al organismo operador.

1.8 ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA

El desarrollo de un sistema de agua potable es comparable con el de una industria, en donde su funcionamiento se asocia con los procesos de captar, conducir, regularizar, potabilizar y distribuir el agua a los consumidores, gestionar la venta del agua, preservar la infraestructura, y dar sustentabilidad institucional y financiera al organismo operador.

Desde esta perspectiva, se pueden identificar tres grupos de procesos en un sistema de agua potable (*Figura 1-22*): a) Ingeniería de producción y distribución, b) Comercialización del servicio y c) Desarrollo Institucional del organismo operador.

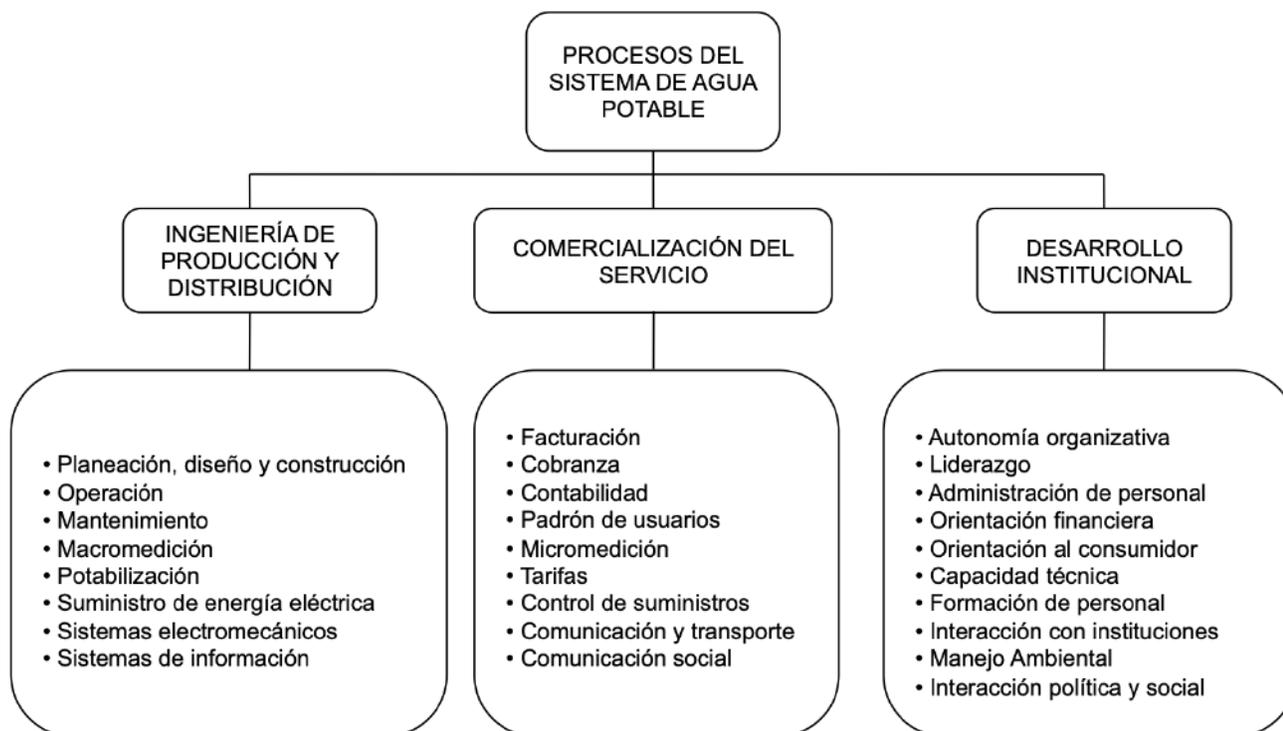


Figura 1-22. Procesos de un sistema de agua potable.

Los tres grupos de procesos de un sistema de agua potable reflejan la complejidad que afronta un organismo operador para mantenerse en un nivel de eficiencia aceptable y muestran las razones del por qué, a pesar de los grandes esfuerzos e inversiones históricos, los sistemas de abastecimiento de agua potable y los organismos operadores no logran alcanzar en ocasiones un funcionamiento óptimo.

El sistema hidráulico para el abastecimiento de agua potable deja de ser eficiente cuando comienza a utilizar excesivos recursos humanos, materiales y económicos dentro de estos tres procesos, para prestar el servicio de calidad a los usuarios de una población.

Los resultados de la baja eficiencia en el proceso del desarrollo institucional son el resquebrajamiento financiero e institucional del organismo operador, bajos niveles de preparación técnica del personal, desorden en la administración gerencial y excesivo número de empleados, entre otros.

En el caso de la deficiencia en el proceso de comercialización del servicio, surgen los problemas de usos clandestinos, baja cobertura de micromedición, usos mal clasificados e identificados, cartera vencida importante, esquemas tarifarios lejos de la realidad, altos consumos de materiales y equipos, y una comunicación con el usuario deteriorada impactando en baja cultura del agua de la sociedad.

Por último, la deficiencia en el proceso de ingeniería ocasiona servicios discontinuos del agua a los usuarios, entrega de agua a los consumidores con bajas presiones hidráulicas, niveles de fugas de agua que llegan a alcanzar hasta el 50% del volumen suministrado, agua no potable en las tomas domiciliarias, y excesivos consumos de energía en los equipos de bombeo con implicaciones económicas hasta del 35% de los ingresos del organismo operador.

El sistema de agua potable es una obra que día tras día se ve afectada por los cambios climáticos, sociales y económicos del lugar. Es un sistema dinámico que debe evolucionar continuamente para adaptarse a las condiciones de crecimiento de la población, costumbres de sus habitantes, inclemencias del clima, capacidad de pago y situación política y legal de la administración pública.

El organismo operador debe, entonces, implementar elementos estratégicos para hacer sostenible al sistema de abastecimiento de agua potable y, en ningún momento, poner en riesgo la infraestructura y el deterioro de la calidad del servicio.

En seguida se listan las estrategias más relevantes que se deben establecer para el desarrollo del sistema de abastecimiento de agua potable:

Diseñar e implementar un plan de 25 años para atender el crecimiento, la rehabilitación y la modernización del sistema de abastecimiento de agua potable. En el plan se definen las futuras fuentes de agua aprovechables, obras y acciones requeridas, niveles de eficiencia por alcanzar, costos de inversión y recuperación, tarifas aplicables y origen de los recursos financieros respectivos.

Impulsar el servicio profesional de carrera en todo el organismo operador, fijando los perfiles del personal acordes a los estándares vigentes de calidad, con programas permanentes de capacitación y certificación.

Implementar un programa de monitoreo continuo del funcionamiento del sistema de abastecimiento y de indicadores de gestión.

Crear un programa permanente de participación y comunicación a la ciudadanía para fomentar la cultura del agua, en actividades orientadas hacia el ahorro y cuidado del agua, a concientizar sobre la importancia del pago del servicio y sensibilizar sobre la importancia del sistema para el desarrollo económico y de protección de la salud en la localidad.

Implementar un fondo económico institucional y establecer los vínculos con asociaciones civiles, entidades de gobierno y locales, para prevenir desastres naturales y disponer de recursos y capacidades en situaciones de emergencia.

En la medida que se coordinen los directivos de diferentes administraciones del organismo operador, para dar continuidad administrativa, financiera y política a estas estrategias, el desarrollo del sistema de abastecimiento será sostenible a lo largo de los años, con beneficios para toda la comunidad.

1.9 LA SECTORIZACIÓN DE LA RED

En el año de 1980 la industria del agua potable del Reino Unido (*Ref.1.3*) propuso una técnica para dividir la red de distribución de agua potable en áreas más pequeñas, aisladas unas de otras hidráulicamente, con la intención de mejorar la gestión del control de las fugas. El documento oficial de esta propuesta fue el *Report 26 Leakage Control Policy & Practice* (UK Water Authorities Association [1980]). Las áreas divididas fueron llamadas “*District Metered Area (DMA)*”; en el idioma español se les conoce como “distritos hidrométricos” (DH). En la *Figura 1-24* se muestra un esquema de una red que presenta el principio básico de los distritos hidrométricos.

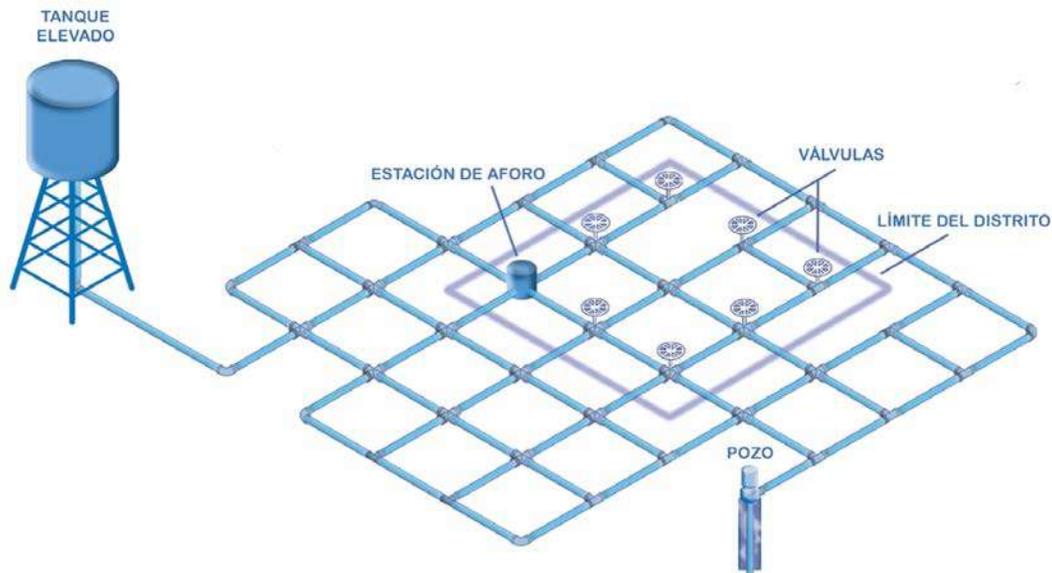


Figura 1-23. Distrito Hidrométrico típico.

Los DH se aíslan del resto de la red mediante el cierre de válvulas o desconexiones de tuberías (Figura 1-24). El suministro de agua a los DH se realiza por una sola tubería, en la cual se coloca un medidor que registra el caudal que ingresa a él. El comportamiento del flujo se analiza para estimar el nivel de fugas de la red de cada distrito. En ocasiones el DH puede tener hasta tres tuberías para suministrar el agua y una o dos salidas hacia otros distritos, simultáneamente.

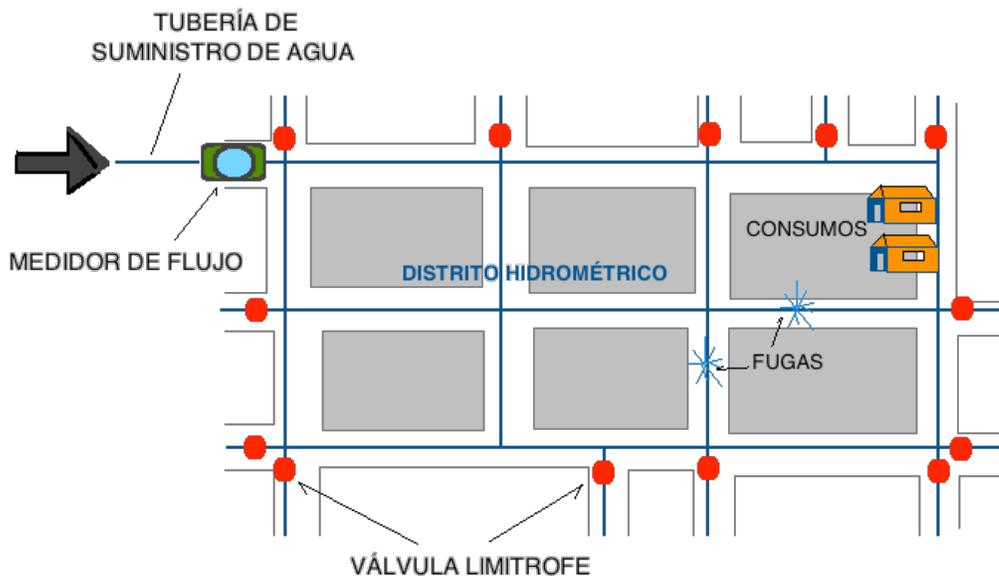


Figura 1-24. Esquema de funcionamiento de un distrito hidrométrico en una red.

Actualmente, los DH de una red de agua potable se definen y diseñan en un contexto más amplio para conformar sectores, de tal forma que en cada uno de ellos se tenga un equilibrio entre los volúmenes

de agua disponibles y los requeridos por los usuarios. Esta forma de diseño y la operación de las redes con sectores, denominada “sectorización de redes de agua potable”, se efectúa con la finalidad de lograr el incremento y estimación de las eficiencias volumétrica, hidráulica y energética integralmente; es decir, controlar fugas, redistribuir el agua en la red y ahorrar energía eléctrica en forma simultánea.

Por lo tanto, hoy en día la sectorización de redes de abastecimiento de agua potable se considera una técnica de diseño y operación hidráulica, que consiste en separar una gran red en pequeñas redes aisladas unas de otras, abastecidas por sus propias captaciones de agua, o mediante un sistema primario de suministro de agua en bloque, con el fin de mejorar el control de su operación y el servicio de agua a los usuarios, como se observa en la *Figura 1-25*.

A diferencia de los sectores hidrométricos, los cuales son aislados física y permanentemente en la red y cuentan con un abastecimiento de agua propio, los distritos hidrométricos se conforman temporalmente con movimientos de válvulas, solo con la finalidad de realizar evaluaciones de fugas, consumos y pérdidas de agua. En este contexto, dentro de los sectores hidrométricos se podrán establecer algunos distritos hidrométricos, pero es necesario analizar su funcionamiento hidráulico, en conjunto, para prevenir fallas en el servicio de agua durante su asilamiento ocasional.

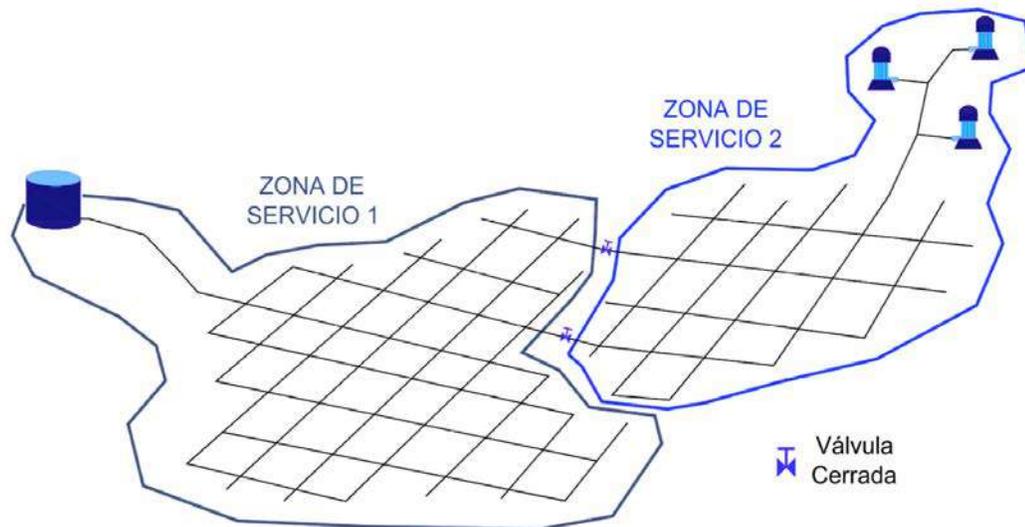


Figura 1-25. Sectorización de una red de distribución de agua potable.

Fuente: Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable, Comisión Nacional del Agua, Nov. 2009, México

El esquema de redes de abastecimiento de agua potable sectorizadas es una práctica mundial de ingeniería de los sistemas hidráulicos urbanos que va aumentando día a día, debido a que las ciudades crecen continuamente y han alcanzado proporciones enormes con una inherente complejidad social, económica y tecnológica de los servicios a sus pobladores. En esta perspectiva, una red de distribución de agua potable convencional mallada es más complicada en su mantenimiento, operación y administración comercial e institucional, que una conformada por sectores.

El principio de subdividir cualquier infraestructura compleja en partes más pequeñas ofrece una manera de establecer un mejor control de todo el sistema e identificar y corregir errores en alguna parte de su proceso productivo. Entonces, el beneficio general de una red de agua potable sectorizada es

disponer de una infraestructura que pueda ser observada y controlada confiablemente, con el fin de otorgar un servicio más eficiente y efectivo a la comunidad, independientemente de la magnitud de la ciudad.

Hablar de la sectorización de una red de agua potable es pensar en un rediseño de la infraestructura existente, debido a que con este nuevo esquema se modificará el diseño original de la red, que ha permanecido desde su inicio, con sus ampliaciones y rehabilitaciones, a lo largo de los años. Inmediatamente que se plantea transformar la red actual en una red con sectores, es necesario resolver el problema de su rentabilidad, a través de un análisis beneficio-costos.

Los costos que ocasiona la sectorización de la red de agua potable, en general, son más altos que los que genera un proyecto convencional, principalmente por las inversiones en la construcción y las implicaciones operacionales y sociales que traerá hacia el interior del organismo operador y hacia los usuarios del sistema de abastecimiento. Ante esta realidad, un proyecto de sectorización difícilmente competirá en costo contra un proyecto convencional. Por esta razón, es indispensable realizar un análisis más profundo donde se incluyan los beneficios derivados del incremento de las eficiencias volumétrica, hidráulica y energética.

Las facilidades para lograr ahorros de agua por reducción de fugas, la optimización de la distribución de las presiones y caudales en las tuberías, y los ahorros económicos por el mejoramiento energético de los equipos de bombeo, son algunos de los parámetros que se deben incluir en los beneficios de un proyecto de sectorización de la red de agua potable.

Es importante mencionar que se debe tener cuidado con esta técnica de ingeniería. Una aplicación desmedida y/o sin elementos sustentados y completos puede conducir a construir una red con un excesivo número de sectores hidrométricos, resultando más compleja operacionalmente y sin los resultados de eficiencia esperados. Este es uno de los riesgos más importantes de los proyectos de sectorización de redes de agua potable.

1.10 PROCESO PARA IMPLEMENTAR LA SECTORIZACIÓN DE LA RED

La implementación de un proyecto de sectorización de la red de abastecimiento de agua potable se divide en cuatro etapas fundamentales: I) Planeación, II) Diseño, III) Construcción e instrumentación, IV) Operación y mantenimiento (*Figura 1-26*).

En la primera etapa de planeación se conforma el anteproyecto de sectorización. Particularmente, en ella se definen las características del funcionamiento hidráulico actual del sistema de agua, los requerimientos de agua y el trazo de sectores. La redistribución del agua para lograr el equilibrio entre la oferta y la demanda de agua es parte crucial de las actividades básicas de la etapa de planeación de sectores.

La segunda etapa del proceso de sectorización incluye el análisis hidráulico a detalle de la red conformada por sectores y distritos hidrométricos, de tal manera que se cumpla con las especificaciones oficiales vigentes. Aquí también se elaboran los planos constructivos, el catálogo de obras, su costo base y se realiza la evaluación económica de la implementación del proyecto.

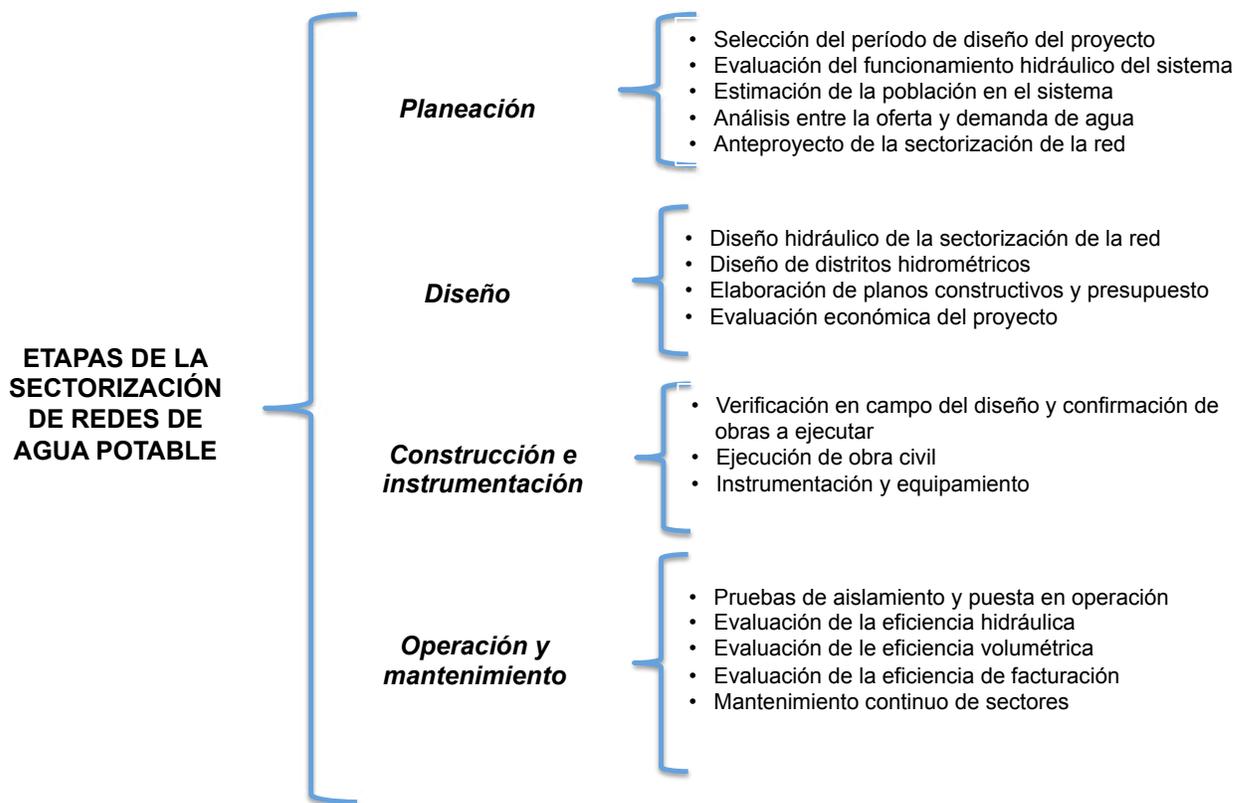


Figura 1-26. Etapas de la sectorización de redes de agua potable.

La tercera etapa se refiere a la ejecución de las obras propuestas en la segunda etapa, incluida la obra civil, instrumentación y equipamiento de los sectores.

La cuarta y última etapa trata sobre las prácticas operacionales y de mantenimiento continuo, enfocadas hacia el incremento y estimación de las eficiencias del sistema de abastecimiento de agua potable.

Para llevar a buen término los esfuerzos emprendidos para implementar un proyecto de sectorización de una red de agua potable, se requiere la aplicación completa y correcta del proceso anterior, adecuando las técnicas a las condiciones particulares de cada sistemas e incorporando herramientas tecnológicas y digitales actuales. Todas las actividades de la sectorización siempre deberán estar enmarcadas en la participación proactiva, tanto de los técnicos y operadores como de los tomadores de decisiones.

A lo largo de las siguientes unidades del libro se exponen las técnicas para desarrollar el proyecto completo de sectorización de la red de agua potable, desde su etapa de planeación, hasta su puesta en operación y mantenimiento continuo de los sectores.

Bibliografía

- [1.1] López A. P., 2006, *Abastecimiento de agua potable y disposición y eliminación de excretas*, Instituto Politécnico Nacional, Alfaomega Grupo Editor, México.
- [1.2] Fair, Geyer y Okun, 1994, *Abastecimiento de agua y remoción de aguas residuales*, Vol. 1, Limusa Noriega editores, México.
- [1.3] *Manual de incremento de eficiencia física, hidráulica y energética en sistemas de agua potable*, Comisión Nacional del Agua - Watergy, nov. 2009, México.
- [1.4] Bourguett O.V., Ochoa A.L., y Ruiz A.A., 2000, *Validación de modelos de rehabilitación de tuberías en Saltillo, Coah.*, IMTA, México.
- [1.5] Pardo Picazo, 2010, *Influencia de los costes del agua y la energía en la renovación de tuberías*, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [1.6] Richard Ainsworth, 2004, *Safe Piped Water, Managing Microbial Water Quality in Piped Distribution Systems*, IWA Publishing and World Health Organisation, UK.
- [1.7] OPS, 2007, *Manuales y guías sobre desastres*, Organización Panamericana de la Salud.

Referencias

- [1.1] Tzachtkov V. y Caldiño V., 2007, *Obras de toma.- Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*, Conagua, México.
- [1.2] Watergy A.C., 2010, “SECTORIZACIÓN REDES DE AGUA POTABLEI, Conagua-GTZ-Connue, México.
- [1.3] Morrison J., Tooms S., Rogers D., *District Metered Areas*, Guidance Notes, Versión 1, Specialist Group Efficient Operation and Management, Water Loss Task, Force, International Water, Association, IWA, Febrero 2007, UK.
- [1.4] Walski T., *Economic Analysis of Rehabilitation of Water Mains*, Water Main Rehabilitation, October 1982.
- [1.5] Pardo P.M., Cabrera M. E. y Cobacho J.R., *Influencia de los costes del agua y la energía en la renovación de tuberías*, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, mayo de 2010, España.
- [1.6] Conagua, 2008, *Lineamientos de acciones electromecánicas contra fenómenos hidrometeorológicos*, Conagua, mayo, México.

Proyectos de referencia

- [1.1] *Estudio y proyecto para sectorización del sistema de agua potable de Juchitán de Zaragoza.- Informe*, 2009.

Ligas internet

- [1.1] <http://liderennoticias.blogspot.com/2011/04/colonia-caroya-nuevo-paso-para-la-obra.html>
- [1.2] <http://www.aguasolutions.com/fundamentals-sp.html>
- [1.3] http://www.radiojai.com.ar/online/notiDetalle.asp?id_Noticia=54935
- [1.4] http://es-la.facebook.com/note.php?note_id=180555655417
- [1.5] <http://globe.gov/sda/tg97es/hidrologia/introduccion.html>
- [1.6] <http://iecca.net/iecca2004/experi2.jpg>
- [1.7] <http://www.fotosimagenes.org/imagenes/escherichia-coli-4.jpg>
- [1.8] <http://eol.org/pages/498214/overview>

- [1.9] <http://www.micrographia.com/specbiol/bacteri/bacter/bact0200/anabae03.jpg>
- [1.10] http://media.eol.org/content/2014/01/21/14/40977_580_360.jpg
- [1.11] http://media.eol.org/content/2012/06/15/21/76591_580_360.jpg
- [1.12] <http://docsadviceformothers.blogspot.mx/2012/12/viral-gastroenteritis-viral-diarrhea.html>
- [1.13] <http://www.google.com.mx/imgres?imgurl=http://www.fortunecity.es/felices/andorra/51/images/legionella%2520-biofilm.jpg>
- [1.14] <http://www.cfe.gob.mx/negocio/conocetarifa/Paginas/Tarifas.aspx>



CAPÍTULO 2

PLANEACIÓN

2.1 CONCEPTOS DE INGENIERÍA BÁSICA DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE

La ingeniería básica del proyecto es la etapa donde se establecen sus lineamientos generales y los planteamientos de solución para mejorar el sistema de abastecimiento de agua potable. Se analizan con profundidad el entorno físico del sistema de abastecimiento de agua, la disponibilidad y calidad de agua, los subsistemas y componentes del proyecto y se dejan marcadas las pautas para el cálculo y definición detallada de las partes del mismo, a través de un anteproyecto evaluado en la factibilidad técnica de su ejecución.

En años recientes, la ingeniería de sistemas de agua potable ha evolucionado gracias al desarrollo de tecnologías de computación, medición y equipamiento; al avance de los procesos de potabilización del agua y al progreso de los métodos y modelos de solución del flujo a presión. Con estas herramientas se tienen más opciones de análisis y diseño, se agilizan los estudios básicos y se mejora la calidad de la infraestructura.

Sin embargo, el quehacer del ingeniero es prácticamente el mismo y las actividades para desarrollar un sistema de abastecimiento de agua potable prevalecen desde hace muchos años. Aunque el desarrollo se trate solamente de obras de ampliación o rehabilitación de algunas partes del sistema de abastecimiento, las actividades que norman el criterio para elaborar la ingeniería básica de toda una ciudad son similares; el ingeniero elegirá las actividades que se enmarquen en un desarrollo parcial. En la *Figura 2-1* se muestra un cuadro sinóptico con las actividades típicas para elaborar la “ingeniería básica” del sistema de agua potable.

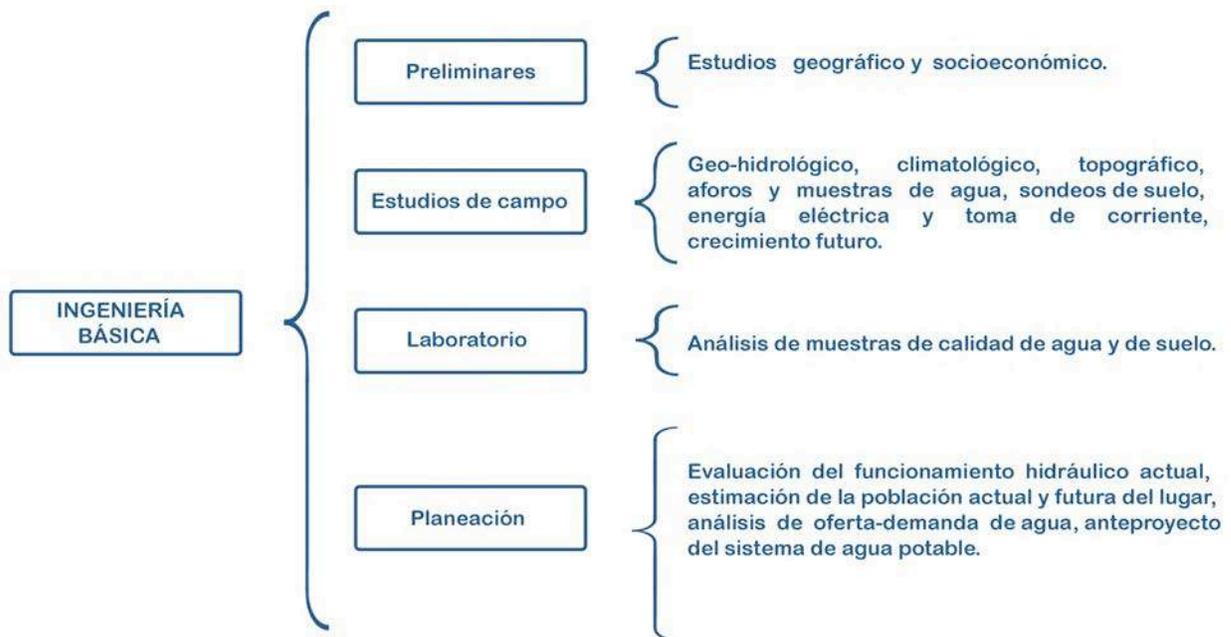


Figura 2-1. Cuadro sinóptico de actividades para la elaboración de la ingeniería básica de un sistema de abastecimiento de agua potable.

a) Actividades preliminares

Son aquellos estudios que se realizan para conocer las condiciones socioeconómicas y culturales de una población donde se encuentra el abastecimiento de agua potable.

Particularmente, se determina la ubicación geográfica del lugar, su categoría política, el tipo de población, características de sus calles y casas, costumbres de habitantes, servicios disponibles (energía eléctrica, teléfono, centros de higiene y salud, mercados, rastros, templos, parques públicos), fuentes de trabajo, población económicamente activa, salario mínimo y otros que den una idea de la vida social y económica de la localidad.

Con estos resultados el ingeniero determina si es factible social y económicamente, o no, llevar a cabo la construcción y operación de las obras de abastecimiento y estimar la capacidad de pago del servicio que tiene la población.

b) Estudios de campo

Los estudios de campo se hacen para determinar las características físicas del lugar donde se encuentra el sistema de agua potable, medir las condiciones físicoquímicas del agua e identificar el detalle de los servicios de electricidad, alcantarillado, telefonía, etc. En seguida, se describen brevemente los principales estudios de campo que se llevan a cabo.

El estudio geohidrológico se refiere a la localización de fuentes de abastecimiento de agua, superficiales y subterráneas, y a la cuantificación del agua disponible en diferentes épocas del año y la forma de aprovechamiento de esas fuentes.

El estudio topográfico comienza con reconocimientos de las zonas de captación y de las probables líneas de conducción, de posibles sitios de la potabilizadora o caseta de cloración, así como de los tanques de regulación. Después, se realizan los levantamientos topográficos de planimetría y altimetría, con curvas de nivel, perfiles y elevaciones en cruceros de calles. El levantamiento topográfico debe partir de “bancos de nivel”, referenciados al nivel medio de mar, que normalmente tiene instalados el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Las temperaturas máxima, media y mínima anual, así como los períodos de lluvias e intensidades de las mismas, se obtienen de estudios de campo con estaciones climatológicas, instaladas por instituciones oficiales; por ejemplo: las que dispone la Conagua en diversas partes del país.

Las muestras de agua para el análisis de su calidad físicoquímica y biológica en laboratorio se toman en recipientes especiales e higiénicos, a profundidades representativas de las fuentes de agua. Es necesario también aforar las fuentes de abastecimiento y las descargas de las obras de captación para determinar el caudal que aportan. En ocasiones, es conveniente realizar mediciones de caudal y presión en algunos sitios de la infraestructura existente; por ejemplo: a la llegada y salida de tanques, rebombeos, líneas de alimentación y en cruceros de la red de distribución.

Los sondeos de suelos se realizan a cielo abierto a profundidades suficientes que permitan identificar el tipo de material que se va a excavar durante la construcción, su resistencia para desplantar estructuras y la resistividad con miras a proteger catódicamente a las tuberías.

En el caso de equipos de bombeo, es recomendable realizar pruebas de eficiencia electromecánica. Un estudio de campo que también debe elaborarse es sobre el voltaje, ciclo y frecuencia de la energía eléctrica, con la finalidad de determinar el tipo de instalaciones eléctricas posteriores y el punto de toma de corriente para conectar los equipos del sistema de abastecimiento de agua potable.

Además de las actividades de campo anteriores, deben recolectarse planos de otros servicios como el alcantarillado, energía eléctrica, teléfono, gas, etc., y tomar nota de los materiales existentes en la región, sus costos, zonas de crecimiento futuro, etcétera.

c) Estudios de laboratorio

Para conocer las características del agua, se realizan los siguientes análisis:

- Físicos. Turbiedad, color, olor, sabor y temperatura.
- Químicos. Composición mineral y contenido de cuerpos contaminantes (cloruros, oxígeno, nitrógeno, nitritos y nitratos, dureza, alcalinidad, acidez, gases disueltos, metales y metaloides).
- Microscópicos. Presencia de desechos industriales, materias fecales, restos textiles, restos de insectos y crustáceos.
- Bacteriológicos. Desarrollo de bacterias y otros microorganismos.
- Radiológicos. Detección de basura radioactiva.

En el caso de los suelos se realizan análisis de resistividad, granulometría, plasticidad y permeabilidad.

d) Actividades de planeación del sistema de agua potable

La planeación de un sistema de agua potable tiene el propósito de definir una estrategia integral para el mejoramiento de la operación de la infraestructura, comercialización del servicio y desarrollo institucional del organismo operador, dentro de un período determinado y atendiendo a la vida útil esperada de sus elementos. Esta planeación se realiza con base en estudios de diagnóstico y pronóstico de los elementos que interactúan en el sistema de agua potable, tales como: infraestructura existente, demanda de agua de los usuarios, disponibilidad y oferta de agua, rentabilidad de las acciones y programa de inversiones.

La planeación del sistema de agua potable comienza con un análisis detallado del funcionamiento hidráulico del sistema de agua potable, apoyado con planos, recorridos de campo y entrevistas con el personal de operación. Se describen las capacidades y estados físicos de la infraestructura, materiales de construcción, forma de operación y problemas que presentan. Asimismo, se actualizan los planos del sistema de abastecimiento de agua sobre cartas catastrales confiables y georreferenciadas, complementados con el reconocimiento en campo de la infraestructura, inspección física de cajas de válvulas y revisión de la fontanería de tuberías.

La segunda actividad de la planeación consiste en determinar la población a la que dará servicio el sistema de agua potable, tanto actual como futura, basando el cálculo en censos históricos oficiales y modelos matemáticos de proyección.

En tercer lugar, se analiza la relación entre la oferta y la demanda de agua; principalmente se define si hay o habrá un desequilibrio entre los requerimientos y la disponibilidad de agua. Se analizan específicamente el volumen suministrado, consumos y variaciones, niveles de fugas, demanda, dotación y los caudales de cálculo hidráulico. También, se determina en cuánto tiempo se requerirán nuevas fuentes de abastecimiento de agua, cuáles de las obras de captación existentes son utilizables, cuántas y de qué tipo deben ser de nueva construcción, y si se debe implementar un programa de reducción de fugas.

Finalmente, en la actividad de la planeación se elabora el anteproyecto del sistema de agua potable, que incluye el esquema de mejoramiento del funcionamiento hidráulico de la captación, líneas de conducción y distribución; los materiales de las tuberías a utilizar y la interacción que tendrá la red con las captaciones, tanques de regulación y rebombes. También, se evalúa la efectividad del esquema seleccionado con respecto al incremento de la eficiencia volumétrica, hidráulica y electromecánica.

Es importante recalcar que durante la fase de planeación del sistema de abastecimiento de agua potable se deben tomar en cuenta las actividades de operación y mantenimiento, ya que desde esta etapa se podrán evitar deficiencias operacionales y problemas del mantenimiento de dicho sistema y se posibilitará el éxito del esquema elegido.

En los siguientes apartados de este capítulo se describirán los procedimientos particulares de la planeación de la sectorización de redes de distribución de agua potable, enmarcados en los lineamientos generales presentados anteriormente.

2.2 PERIODO DE DISEÑO Y VIDA ÚTIL DE LAS OBRAS

Las obras de sectorización que se pretendan construir en un sistema de abastecimiento de agua potable se deben planificar para un intervalo de tiempo futuro, denominado “periodo de diseño”, tiempo en el cual se estima que dichas obras alcancen su nivel de saturación.

Los periodos de diseño se vinculan con los aspectos económicos, que están en función del costo del dinero; esto es, a mayores tasas de interés menor periodo de diseño. Sin embargo, no se puede desatender los aspectos técnicos, por lo que en la selección del periodo de diseño se deben considerar ambos puntos.

Considerando lo anterior, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) recomienda que el periodo de diseño sea de diez años, con excepción de aquellas obras en que no se puedan concebir proyectos modulares (obras que no pueden actualizarse o ampliarse fácilmente). En el *Cuadro 2-1*, se muestran los periodos de diseño recomendables para la construcción de obras de abastecimiento de agua potable, publicados por la Conagua (*Ref. 2.1*).

Cuadro 2-1. Periodos de diseño para elementos de sistemas de agua potable (Ref. 2.1).

Elemento	Periodo de diseño (años)
Captación:	
a) Pozo	10 a 20
b) Embalse (presa)	hasta 50
Línea de conducción	de 20 a 30
Planta potabilizadora	de 10 a 20
Estación de bombeo	de 10 a 20
Tanque	de 10 a 20
Red de distribución primaria	de 10 a 20
Red de distribución secundaria	a saturación

En proyectos de sectorización el período de diseño se recomienda que sea entre 10 y 15 años, en función de la saturación de la red secundaria.

Por otro lado, la “vida útil” es el tiempo que se espera que la obra de sectorización sirva a los propósitos de diseño, sin tener gastos de operación y mantenimiento elevados, que hagan antieconómico su uso o que requiera ser eliminada por insuficiente.

La vida útil está determinada por la duración misma de los materiales de los que estén hechos los componentes de la obra, por lo que es de esperar que este lapso sea mayor que el periodo de diseño. La vida útil de las obras depende de los siguientes factores:

- Calidad de la construcción y de los materiales utilizados
- Calidad de los equipos
- Diseño del sistema
- Calidad del agua
- Operación y mantenimiento

En la selección de la vida útil, es conveniente considerar que generalmente la obra civil tiene una duración superior a la obra electromecánica y de control. Asimismo, las tuberías tienen una vida útil mayor que los equipos, pero no tienen la flexibilidad de sustitución de éstos, puesto que se encuentran enterradas. En el *Cuadro 2-2*, se muestran valores de la vida útil de varias obras de abastecimiento de agua potable, publicados por la Conagua (*Ref. 2.1*).

Cuadro 2-2. Vida útil de elementos de un sistema de agua potable y alcantarillado (Ref. 2.1).

Elemento	Vida útil (años)
Pozo:	
a) Obra civil	de 10 a 30
b) Equipo electromecánico	de 8 a 20
Línea de conducción	de 30 a 40
Planta potabilizadora:	
a) Obra civil	40
b) Equipo electromecánico	de 15 a 20
Estación de bombeo:	
a) Obra civil	40
b) Equipo electromecánico	de 8 a 20
Tanque:	
a) Elevado	20
b) Superficial	40
Red de distribución primaria	de 20 a 40
Red de distribución secundaria	de 15 a 30

Los periodos de diseño de las obras y acciones necesarias, para la planeación del desarrollo de la sectorización de los sistemas de agua potable, se determinan, por un lado, tomando en cuenta que estos son siempre menores que la vida útil de los elementos del sistema y, por otro, considerando que se tendrá que establecer un plan de mantenimiento o sustitución de algún elemento, antes que pensar en la ampliación, mejoramiento o sustitución de todo el sistema.

Los elementos para la sectorización de la red de un sistema de agua potable se proyectan con una capacidad prevista hasta el periodo de diseño. Rebasado el periodo de diseño, la obra continuará funcionando con una eficiencia cada vez menor, hasta agotar su vida útil.

2.3 FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL SISTEMA

La planeación de la sectorización del sistema de agua potable inicia a partir del conocimiento de la infraestructura existente y de su operación hidráulica. Por esta razón, es necesario realizar una inspección detallada de sus componentes, capacidades, problemas y posibilidades.

La información y datos disponibles en el organismo operador de agua deben analizarse y concentrarse en planos, tablas, graficas, figuras, croquis y fotografías para disponer de una visión integral del sistema de abastecimiento. Esta información debe estar actualizada y disponible para consulta posterior.

La evaluación del funcionamiento hidráulico del sistema de abastecimiento de agua potable consiste en realizar un inventario de la infraestructura, actualizar los planos y analizar la operación de la red de distribución; esta evaluación del funcionamiento se facilita con entrevistas al personal de operación, recorridos de campo por las obras del sistema y algunas mediciones complementarias.

2.3.1 Inventario de la infraestructura

Para tener un conocimiento muy claro de la infraestructura existente y de su funcionamiento hidráulico, se deben responder las preguntas siguientes: ¿Cuál es la obra de captación? ¿Cuántos pozos y rebombes hay? ¿Qué tanques existen? ¿Con qué tuberías se distribuye el agua? ¿Cuáles son los problemas más comunes en su operación? etcétera.

Por ello, es preponderante realizar la recolección de datos e información referente a pozos, tanques de regulación, rebombes y red de distribución, tal como se muestra en los ejemplos de los Cuadro 2-3 a Cuadro 2-6.

Cuadro 2-3. Ejemplo de información de pozos por recolectar.

No.	Nombre del pozo	Ubicación	Diámetro (pulgadas)	Potencia (HP)	Caudal medio (L/s)	Horario de operación	Profundidad del Nivel dinámico (m)
1	Los Gallos	Esq. Vista Hermosa a No. 25 Col. San Juan	8	75	41.5	3:00-17:45	-55.0
...
27	Loma Bonita	Calle cinco No. 345, Prados Verdes	6	55	27.2	24 hr	-56.6

Cuadro 2-4. Ejemplo de datos de tanques de regulación por recolectar.

No.	Nombre del tanque	Ubicación	Tipo	Material	Capacidad (m3)
1	Pinos 1	Av. Centenario No. 185, Col. Patria	Superficial	Mampostería	450
...

No.	Nombre del tanque	Ubicación	Tipo	Material	Capacidad (m3)
15	Olimpia	Parque Nacional, zona centro	Elevado	Acero	260

Cuadro 2-5. Ejemplo de recolección de datos de rebombos.

No.	Nombre del rebombos	Ubicación	No. Equipos	Potencia de cada equipo (HP)	Caudal medio (L/s)	Horario de Operación	Profundidad del Nivel dinámico (m)
1	Unidad Las Flores	Calle Tulipanes No. 1032, Col. Vergel	2	34	83.0	24 hr	-2.4
...
6	El Mirador	Av. Simón Bolívar, Sur	4	14	27.2	22:00 – 18:00	-3.2

Cuadro 2-6. Ejemplo de recolección del inventario de tuberías.

Diámetro de tuberías en pulgadas	Longitud de la red en kilómetros
72"	180.3
...	...
10"	89.6
8"	390.9
6"	609.4
4"	810.0
3"	986.0
Total	3,150.2

Si existen otros datos que se consideren importantes, que ayuden a la descripción de la infraestructura, entonces se recopilan y agregan a los cuadros anteriores.

Asimismo, si existe alguna presa o una planta potabilizadora u otra obra de captación o conducción, se deben obtener sus datos más relevantes, como son los caudales, niveles, ubicación y cota, tipo de infraestructura, entre otros.

Es recomendable elaborar una imagen satelital de la ciudad en el explorador *Google Earth*, para que se tenga una fotografía aérea y se pueda visualizar de manera general las características de la población donde se encuentra el sistema de agua potable. En este mapa satelital se ubican todas las estructuras importantes de la infraestructura del sistema de abastecimiento de agua potable, como se muestra en el ejemplo de la *Figura 2-2*. Estas gráficas e imágenes ayudan a entender más rápido el funcionamiento hidráulico global del sistema.

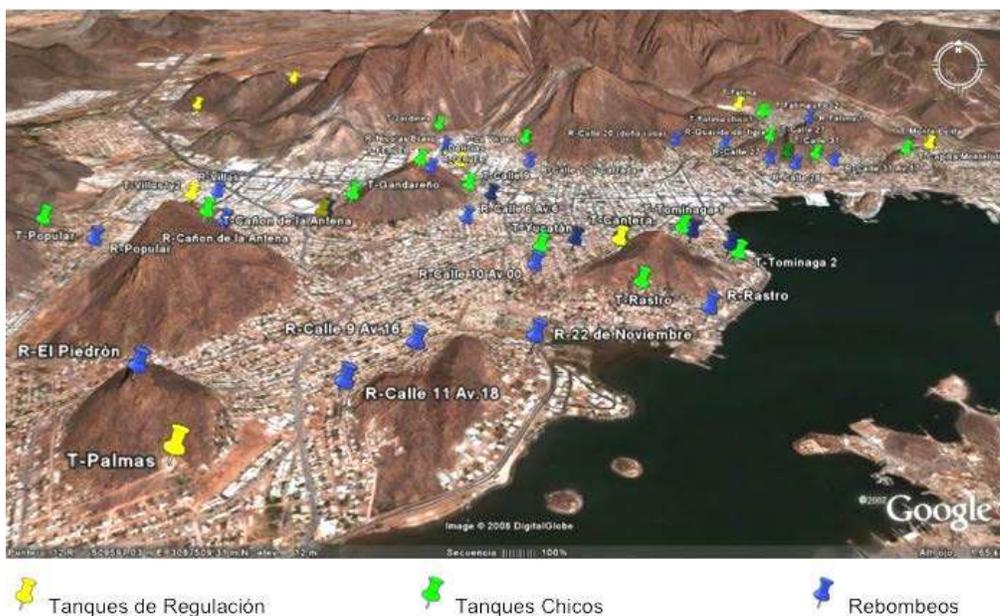


Figura 2-2. Ubicación de infraestructura de abastecimiento en imagen satelital.

Después de clasificar y analizar la información recolectada de la infraestructura, se efectúan entrevistas a los operadores del sistema de agua potable, con el afán de investigar las condiciones físicas de la red y su funcionamiento a detalle. La mayoría de las ocasiones, estas entrevistas se realizan durante un recorrido de campo por las principales zonas y estructuras de la red. Conviene que se inicie el recorrido por las obras de captación, por ejemplo: pozos, galerías filtrantes, presas, obras de toma de ríos, etc., y se termine con la infraestructura dentro de la red; esto con la finalidad de que se visualice al sistema desde el suministro de agua hasta su distribución. Es importante que en los recorridos de campo se tomen fotografías de todas las estructuras, panorámicas y de detalles.

Con toda la información que se recopiló, analizó y elaboró se escribe un informe técnico explicando las diversas obras que componen el sistema de abastecimiento de agua de la localidad en estudio. En el informe técnico se anexan las tablas, fichas, fotografías e imágenes. El siguiente índice puede ser de ayuda para ordenar este informe:

- Actividades de recolección de datos, entrevistas y recorridos de campo.
- Datos geográficos y climáticos de la localidad.
- Fuentes de abastecimiento y estructuras de captación.
- Obras o equipos de potabilización.
- Líneas de conducción.
- Equipos de rebombes.
- Tanques de regulación.
- Red de distribución.
- Obras accesorias.

2.3.2 Revisión y actualización de planos

La revisión, preparación, ordenamiento y actualización de los planos de un sistema de agua potable es una labor clave en el proceso de planeación de la sectorización de la red. Para esta actividad, el apoyo y disponibilidad del personal de proyectos y de operación de la empresa de agua es fundamental, pues tienen un gran conocimiento físico de la infraestructura.

Es muy importante que los trabajos de la preparación y actualización de los planos tengan un nivel de confiabilidad muy alto, pues de ello depende directamente el plan, diseño, construcción, operación y mantenimiento del sistema de abastecimiento de agua potable sectorizado. El uso de herramientas tecnológicas de cómputo, tales como el *Autocad*, *GIS* y *Google Earth*, son de mucha utilidad en este proceso, pues facilitan y agilizan el manejo de información y captura de datos.

2.3.2.1 Exploración, ordenamiento digital y mejoramiento de la calidad de planos

a) *Recopilación y revisión de planos existentes*

El proceso de revisión y actualización de planos del sistema incluye la recopilación de la mayor cantidad de información al respecto y entrevistas al personal técnico del organismo operador. Los planos que se acopian son los siguientes:

- Plano de la traza urbana de la localidad en estudio.
- Planos topográficos de la localidad.
- Planos hidráulicos de la red.
- Planos de obras de captación, regularización, bombeo, potabilización y conducción.
- Planos de operación hidráulica.
- Planos de detalle de fontanería o piezas especiales de tanques, rebombeos, trenes de descarga de equipos de bombeo instalados en captaciones.

Para facilitar el trabajo, se recomienda recopilar los planos en archivos digitales, normalmente en el programa *Autocad*; de cualquier manera, los planos impresos también son muy útiles. En los siguientes incisos se describen los principales detalles que se deben tener en cuenta para la actualización de los planos.

b) *Planos de la red de distribución*

Los planos de la red de distribución deben estar dibujados con calidad y legibilidad. Se debe verificar que la planimetría o traza de la ciudad esté dibujada en un plano georreferenciado y escalado; es decir, debe estar dibujada en las coordenadas geográficas universales reales de la localidad. Si la planimetría donde se ubica el sistema de agua potable tiene problemas de escala y no está georreferenciada, como por ejemplo el que se muestra en la *Figura 2-3*, se deben hacer las correcciones necesarias.

La red de tuberías de la ciudad en estudio debe estar trazada con la simbología de diámetros de tubería, tanques, rebombeos, captaciones, plantas potabilizadoras y válvulas de seccionamiento y automáticas. En la *Figura 2-4* se presenta la simbología utilizada para el dibujo de planos de la red de distribución de agua potable publicada por la Conagua (*Ref. 2.2*). Las válvulas de seccionamiento y de control automático de la red deben estar señaladas en los planos, indicando si se encuentran abiertas,

cerradas o parcialmente abiertas. Para el caso de las válvulas automáticas, deberán estar anotados los valores de presión y caudal de diseño en relación al tipo de válvula.



Planimetría desfasada y con errores en longitudes



Planimetría corregida en escala y georreferenciada

Figura 2-3. Planimetría con y sin errores de escala.

	Válvula de desfogue	----	5.0 cm (2")
	Hidrante público	-/-/-/-/-/-/-/-	6.0 cm (2 1/2")
	Túnel o galera	-----	7.5 cm (3")
	Pozo	-----	10.0 cm (4")
	Desfogue a alcantarillado	-/-/-/-/-/-/-/-	15.0 cm (6")
	Hidrante para incendio	-X-X-X-X-X-X-X-	20.0 cm (8")
	Válvula de seccionamiento	-----	25.0 cm (10")
	Válvula de retención (check)	- --- --- --- ---	30.0 cm (12")
	Válvula de expulsión de aire	-+---+---+---+---	35.0 cm (14")
	Planta de bombeo	- +--- +--- +--- +	40.0 cm (16")
	Cruce de tubería sin conexión	-----	45.0 cm (18")
	Caja rompedora de presión	-----	50.0 cm (20")
	Planta de tratamiento	-+---+---+---+---	61.0 cm (24")
	Garza	-X---X---X---X---	76.0 cm (30")
	Tapa ciega	-XI---XI---XI---XI-	91.5 cm (36")
	Cambio de diámetro	--XI---XI---XI---XI---	107.0 cm (42")
	Tanque elevado o superficial	-XX---XX---XX---XX-	122.0 cm (48")
	Caja asfaltada o azolvada	-XX---XX---XX---XX-	183.0 cm (72")
	Caja fuera de funcionamiento	-----	Diámetro indefinido

Figura 2-4. Simbología de tuberías para dibujo de planos de redes de agua potable (Conagua).

En la Figura 2-5 se muestra un plano típico de una red de distribución de un sistema de agua potable.

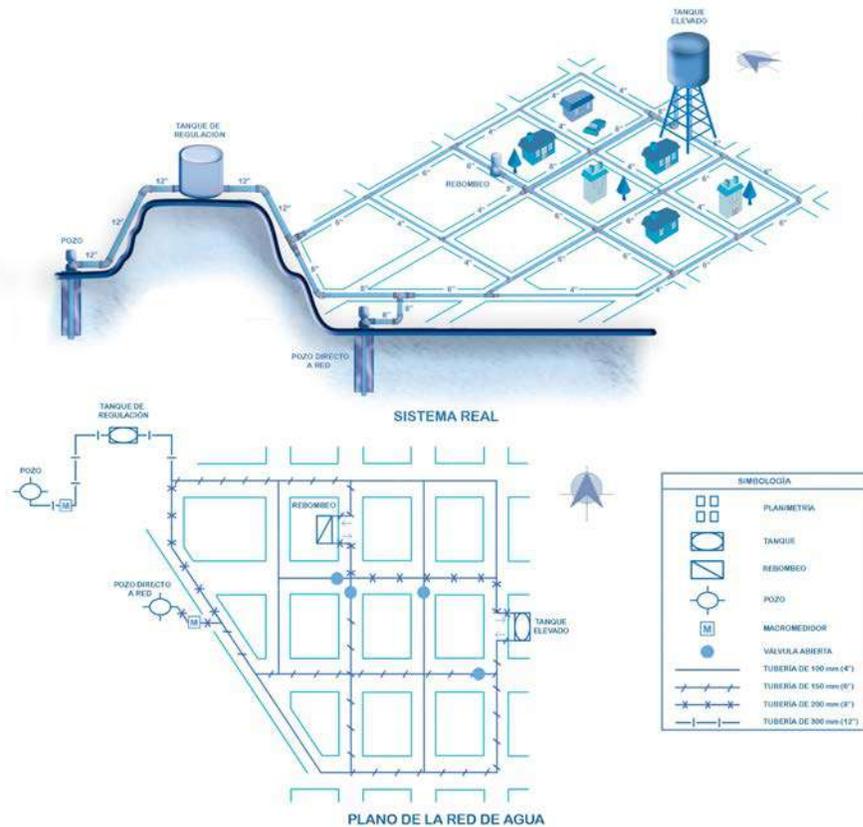
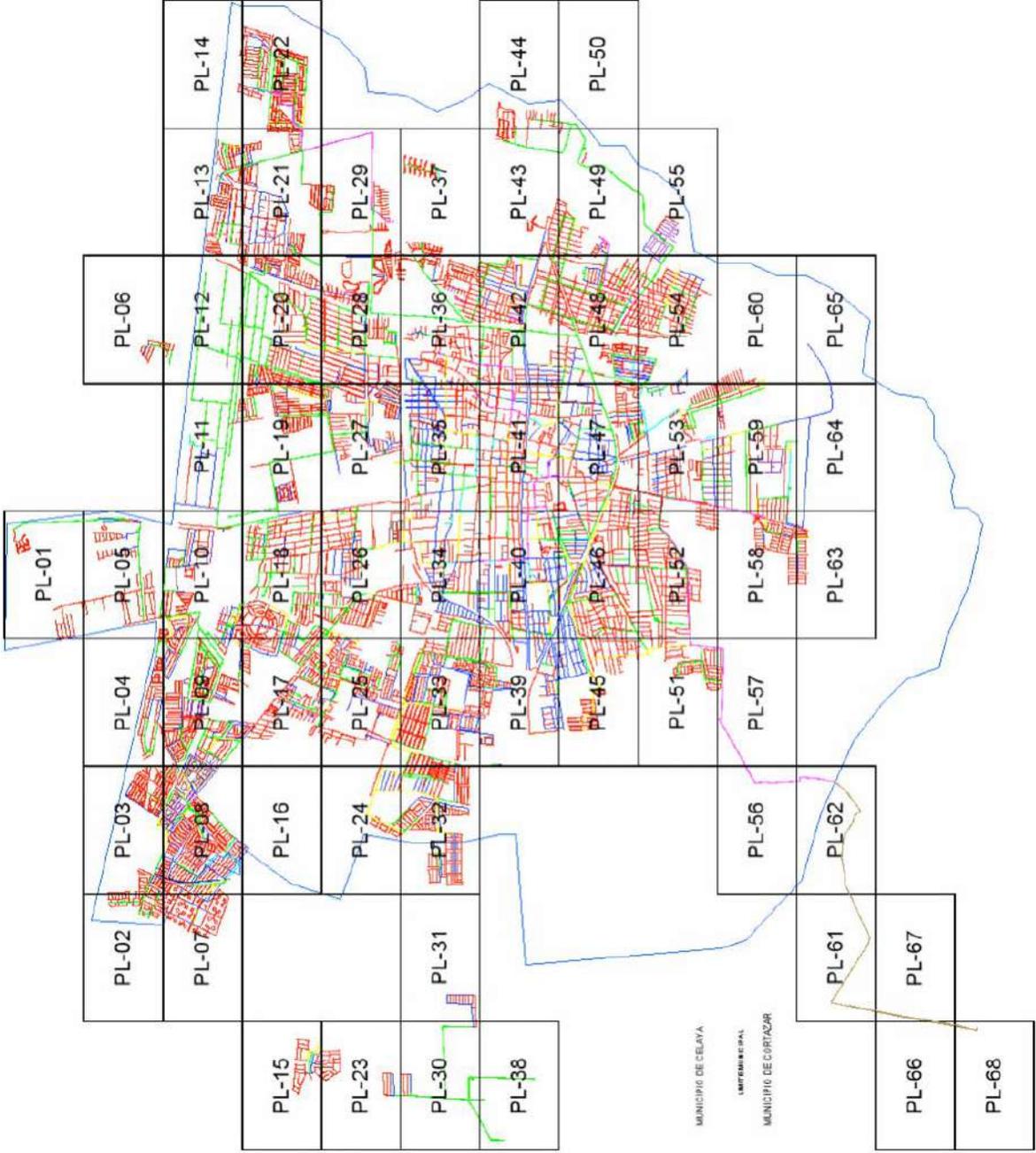


Figura 2-5. Plano típico de la red de distribución de agua potable.

Puesto que un solo plano impreso de toda la red resulta en ocasiones ilegible, se requiere dividirlo y presentarlo en una escala 1:2000. Por lo tanto, se elabora el número de planos que sea necesario, indicando en forma esquemática un mosaico que muestre achurado el plano del que se trata, como se muestra en la *Figura 2-6*.



a. Plano de la red de agua potable formado en mosaicos a escala 1:2000.

El detalle de cruceros de la red de distribución de agua debe dibujarse de acuerdo con la simbología especificada en los manuales de diseño y/o especificaciones vigentes. En la *Figura 2-7* se indican los signos convencionales para piezas especiales en distintos materiales (hierro fundido, fibrocemento, PVC), utilizados en México (*Ref. 2.2*), y en la *Figura 2-8* se muestra un plano típico de cruceros de la red de distribución.

Piezas especiales para hierro fundido		Piezas para PVC	
	Válvula reductora de presión		Cruz
	Válvula de altitud		Te
	Válvula aliviadora de presión		Extremidad campana
	Válvula para expulsión de aire		Extremidad espiga
	Válvula de flotador		Reducción campana
	Válvula de retención (check) de h.f. con brida		Reducción espiga
	Válvula de seccionamiento de h.f. con brida		Cople doble
	Cruz de h.f. con brida		Adaptador campana
	Te de h.f. con brida		Adaptador espiga
	Codo de 90 de h.f. con brida		Tapon campana
	Codo de 45 de h.f. con brida		Tapon espiga
	Codo de 22 30' de h.f. con brida		Codo de 90
	Reducción de h.f. con brida		Codo de 45
	Carrete de h.f. con brida (corto y largo)		Codo de 22 30'
	Extremidad de h.f. con brida		Adaptador FC - PVC
	Tapa con cuerda		
	Tapa ciega de h.f.		
	Junta Gibault		

Figura 2-7. Simbología de piezas especiales para redes de agua potable (Conagua).

c) Planos topográficos

Los planos de la topografía del lugar se dibujan de tal forma que se puedan identificar fácilmente las curvas de nivel y las cotas de su separación entre ellas. Los planos deben cubrir por completo la zona del sistema de agua potable. Se recomienda que las curvas de nivel se dibujen a cada metro y que las elevaciones estén referidas al nivel medio del mar, como se muestra en la *Figura 2-9*.

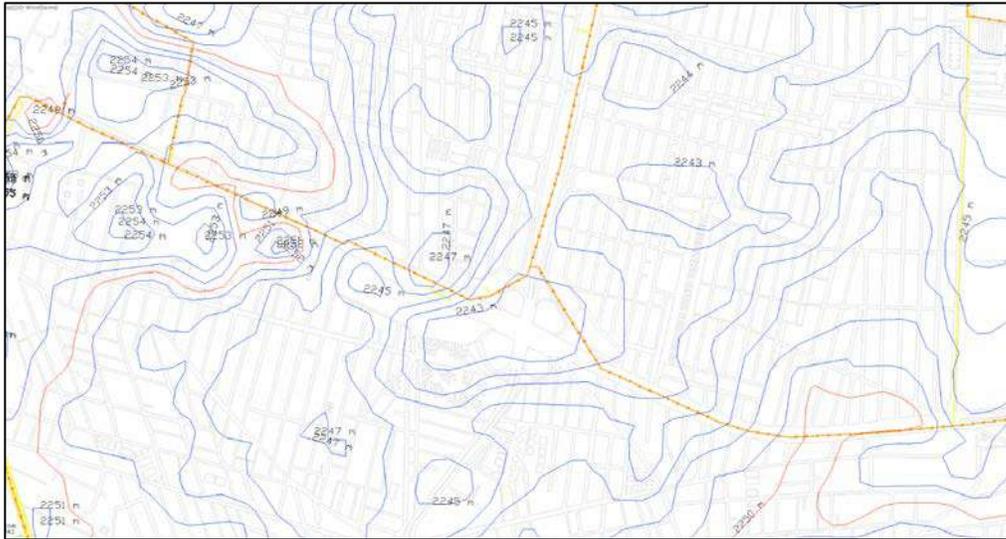


Figura 2-9. Plano topográfico con detalle de curvas de nivel.

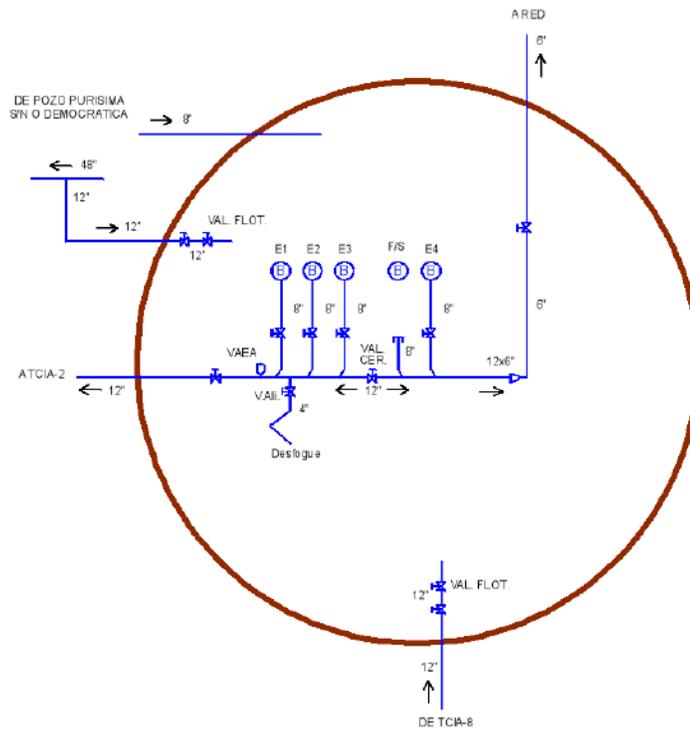
Cuando el organismo operador de agua no cuente con planos con curvas topográficas de la ciudad, se deben realizar los levantamientos correspondientes. Sin embargo, si no se cuenta con recursos y tiempo suficientes, se utilizan los archivos que publican instituciones oficiales. Por ejemplo, en México existe la oficina en el INEGI, que proporciona información sobre las curvas de nivel de todas las ciudades mexicanas, con bastante aproximación.

d) Planos de fontanería de la infraestructura

Es necesario elaborar el plano con la fontanería o de piezas especiales a detalle de la infraestructura existente (tanques, pozos, rebombeos, potabilizadoras, galerías filtrantes, etc.), señalando la ubicación, simbología de tuberías y piezas especiales como: medidores, pozos, tanques, válvulas, codos, tuberías, diámetros y tipo de material. En la *Figura 2-10* se muestran algunos dibujos que se incluyen en el plano de fontanería de la infraestructura.



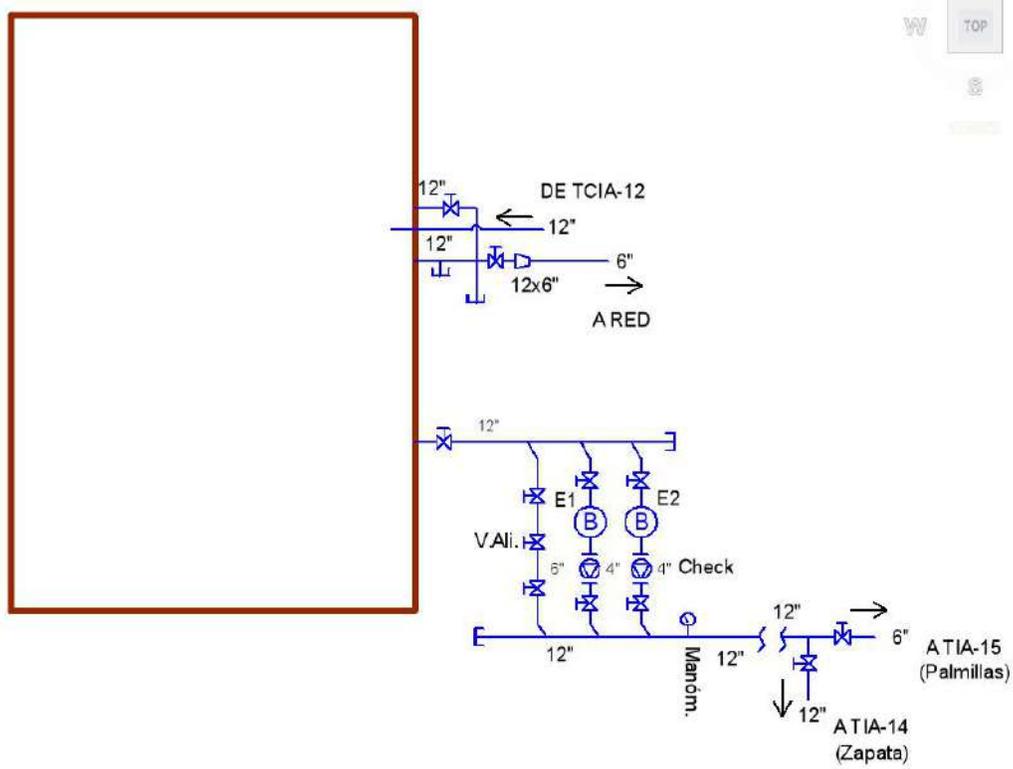
a.1. Infraestructura



a.2. Dibujo en el plano



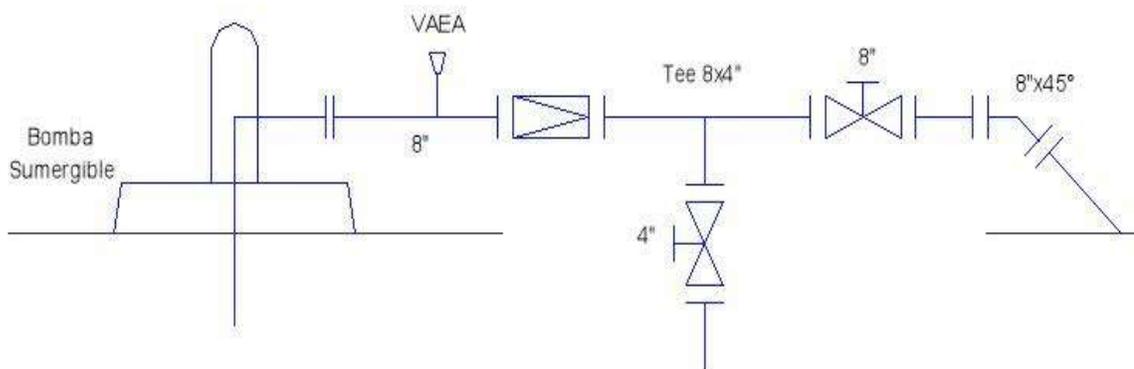
b.1. Infraestructura



b.2. Dibujo en el plano



c.1. Infraestructura

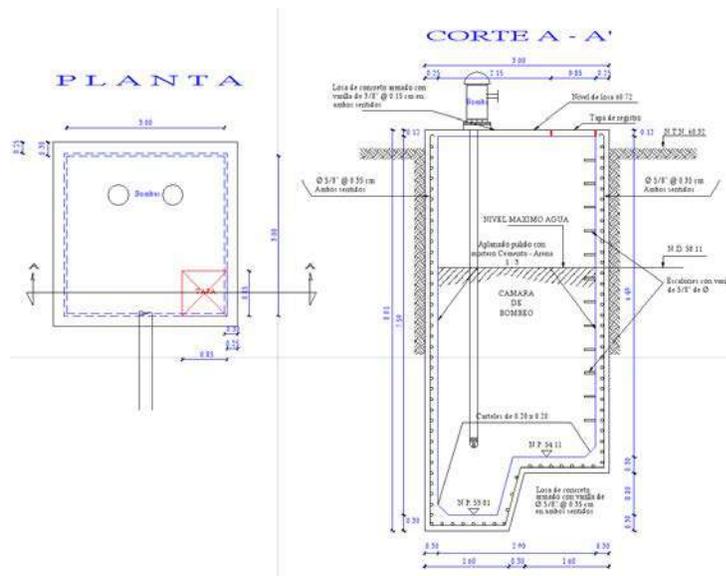


c.2. Dibujo en el plano

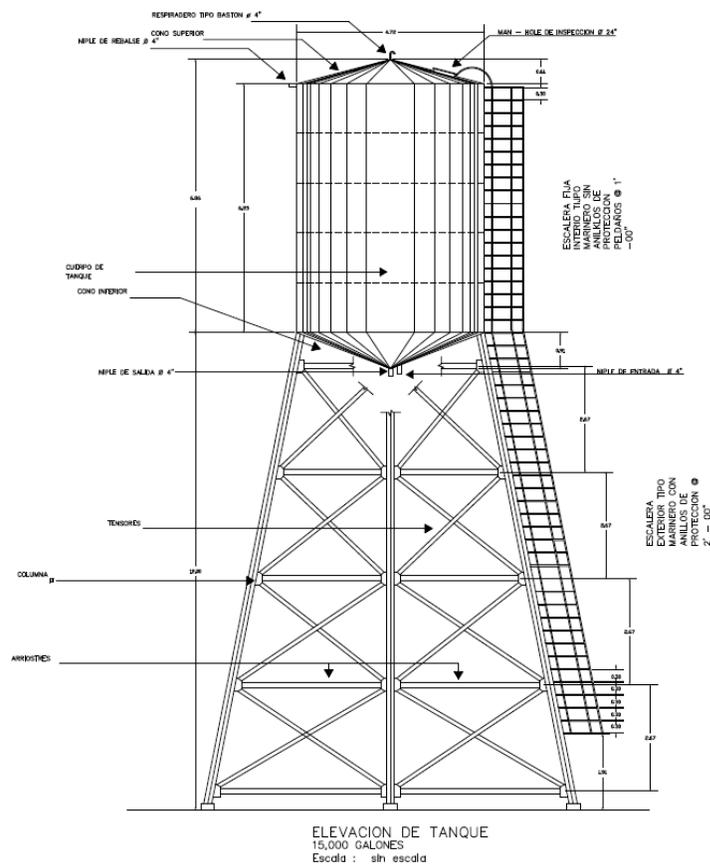
Figura 2-10. Dibujos para los planos de fontanería de infraestructura.

e) Planos de obras de captación, potabilización, regularización, bombeo y conducción

Los planos hidráulicos de las obras de captación, potabilización, regularización y bombeo se dibujan individualmente, con su planta, cortes, perfiles, tuberías y detalles de accesorios. Estos planos son útiles para consulta de su operación o cuando se diseñan rehabilitaciones o ampliaciones a la infraestructura existente. Algunos planos tipo se muestran en la *Figura 2-11*.



a) Cárcamo de bombeo



b) Tanque de regularización

Figura 2-11. Planos hidráulicos típicos de obras del sistema de abastecimiento de agua potable.

El plano del perfil de líneas de conducción se dibuja a escala distorsionada, menor el eje de las longitudes y mayor el eje de las elevaciones, con el fin de visualizar mejor los cambios de pendiente de su trazo, tal como se muestra en la *Figura 2-12*. Los planos de las conducciones de agua potable se requieren para realizar los análisis hidráulicos de flujo transitorio, protección contra golpe de ariete, llenado y vaciado, entre otros, derivados del proceso de sectorización de la red.

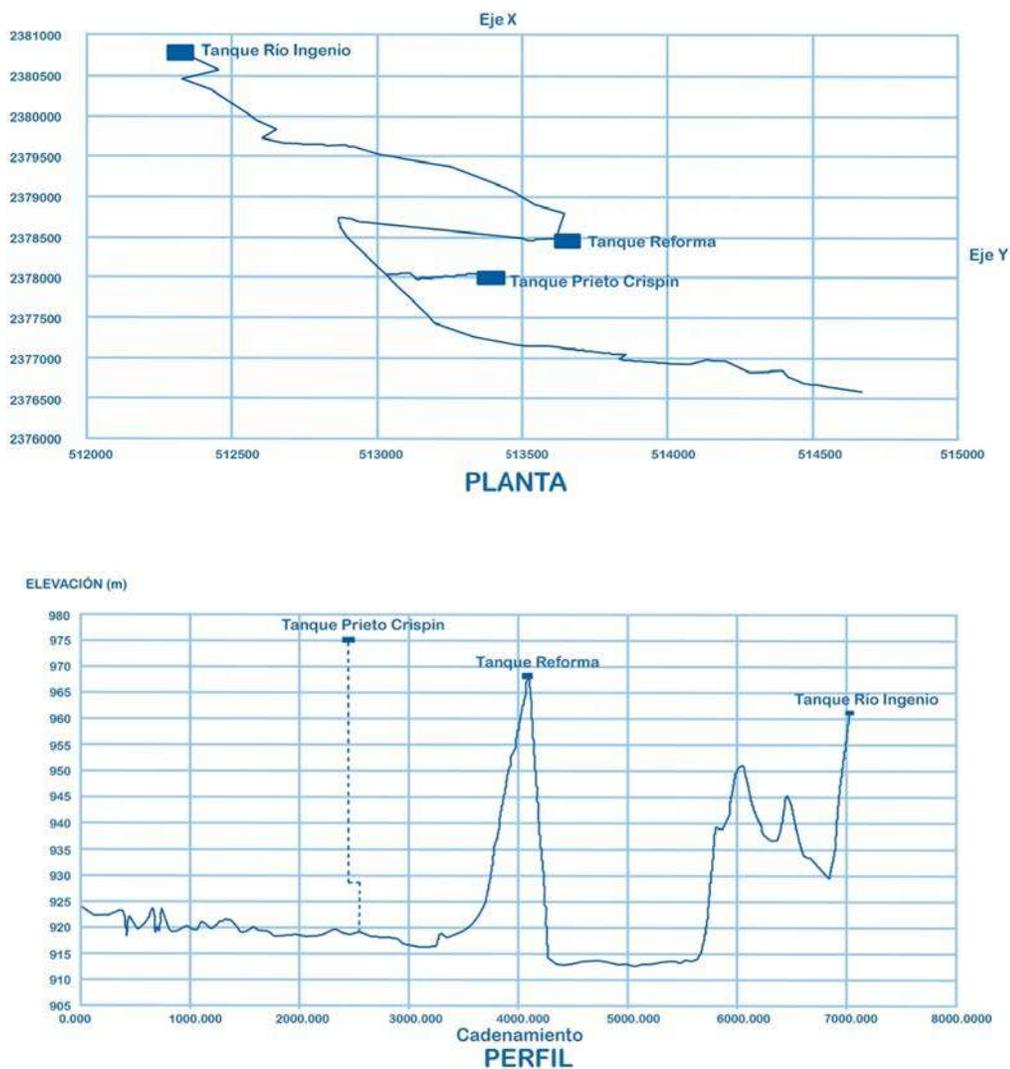


Figura 2-12. Plano hidráulico del trazo de línea de conducción de agua potable.

2.3.2.2 Trabajos de campo en la actualización de planos

a) Levantamiento de cajas de válvulas de la red

La inspección en campo de cajas de válvulas tiene la finalidad de complementar la información del plano de la red de distribución de agua, evaluar el estado de las cajas y válvulas, y detectar fugas en los volantes y juntas de las válvulas.

El número de cruceros de válvulas por inspeccionar y su elección, están en función de las dudas anotadas en los planos y cuando se presenten las siguientes situaciones:

- Zonas de la red donde no se tiene información ni planos de las tuberías.
- Zonas donde se tienen dudas de los diámetros de las tuberías.
- Cruceros de la red con grandes diámetros de tuberías.
- Cruces con probable derivación de agua sobre líneas de conducción.
- Cajas con válvulas de control automático.

El trabajo de campo es sencillo y consiste en ubicar la caja por inspeccionar, destaparla y registrar los datos respectivos. La actividad se apoya en formatos de campo que contienen la siguiente información: ubicación geográfica, croquis de localización, detalle de piezas especiales (codos, válvulas, tuberías, atraques, etc.), diámetros, material, estado físico de la caja y observaciones. En caso de que la caja se encuentre azolvada o inundada será necesaria su limpieza, pero deberá anotarse esta situación en los formatos de ayuda. En la *Figura 2-13* se muestra un formato tipo de caja de válvula inspeccionada en campo.

Calles:	LAS FLORES Y TEODORO		
Colonia:	RANCHO GRANDES		
No. de cruce:	749	No. de caja:	74
No. de tapas:	1	No. de válvulas:	2
Referencias:			
La caja se encontraba azolvada por:	TIERRA	ESCOMBRO	INUNDADA

CARACTERÍSTICAS DE LA VÁLVULA	
Diámetro (plg):	1 DE 4", 1 DE 6"
Tipo de vástago:	SIN VOLANTE
Comentarios:	
Fotografía de la válvula	

Fotografía del cruce	

Observaciones generales:
1 VÁLVULA DE 4", 1 VÁLVULA DE 6" SIN VOLANTE, 1 TE DE 6 "X4", TUBERÍA DE PVC.

Figura 2-13. Formato tipo de levantamiento de caja de válvula.

b) Levantamiento de fontanería de pozos, tanques y rebombes

El trabajo de levantamiento físico de la fontanería de la infraestructura hidráulica de tanques, rebombes, pozos y otras obras de abastecimiento, consiste en visitar en campo todas las obras y revisar sus detalles hidráulicos. Para esto se recomienda realizar el recorrido junto con el personal de operación, para que indiquen la ubicación precisa de la obra y los pormenores de su funcionamiento hidráulico.

El trabajo se facilita si se utilizan algunos formatos como el que se muestra en la *Figura 2-14*. En ellos se apuntan las características más importantes, como son: croquis de localización, detalle del arreglo de tuberías, fotografías y datos particulares de la infraestructura hidráulica. Se recomienda utilizar la simbología correspondiente en el dibujo de piezas especiales. Si se tiene dificultad para identificar los diámetros de tuberías y accesorios como válvulas y medidores, estas últimas tienen el diámetro grabado en el cuerpo y en las tuberías se pueden medir con alguna cinta métrica.

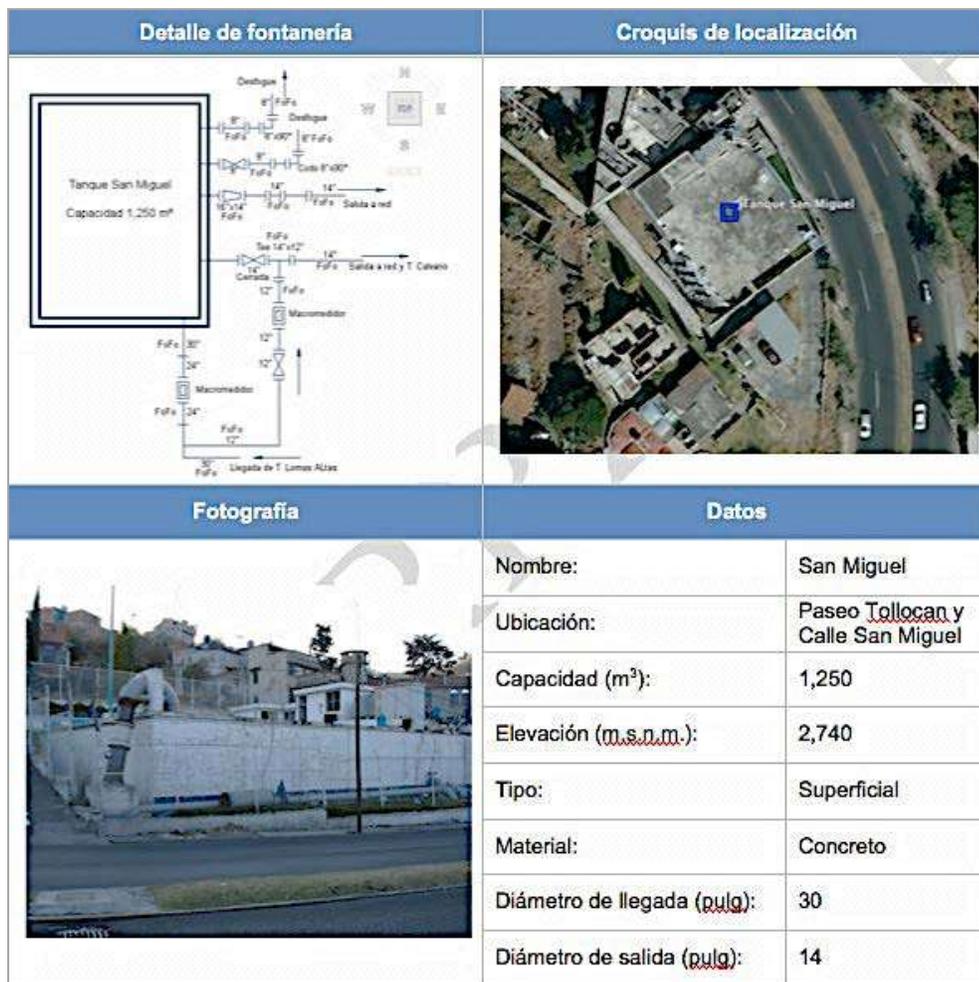


Figura 2-14. Formato tipo del levantamiento de fontanería de infraestructura hidráulica de agua potable (tanque de regularización).

2.3.3 Análisis de la operación del sistema

Además de inventariar la infraestructura, analizar su estado físico y actualizar los planos, es necesario también que se evalúe el funcionamiento hidráulico global de todo el sistema de abastecimiento de agua.

Para facilitar esta actividad, se imprime un par de planos de toda la red de distribución a una escala en la que se pueda visualizar todo el sistema. Sobre estos planos y con apoyo de entrevistas con los operadores, se dibujan las zonas de influencia de tanques y pozos, y con flechas se indican los sentidos de los caudales. Asimismo, se limitan las zonas con problemas de suministro de agua y se anotan los horarios de operación y de servicio de agua a los usuarios.

Con esta información se recomienda elaborar un diagrama unifilar, como el que se muestra en la *Figura 2-15*, donde se esquematice de manera integral el funcionamiento general del sistema de agua potable y se visualice gráficamente su operación actual y los problemas asociados.

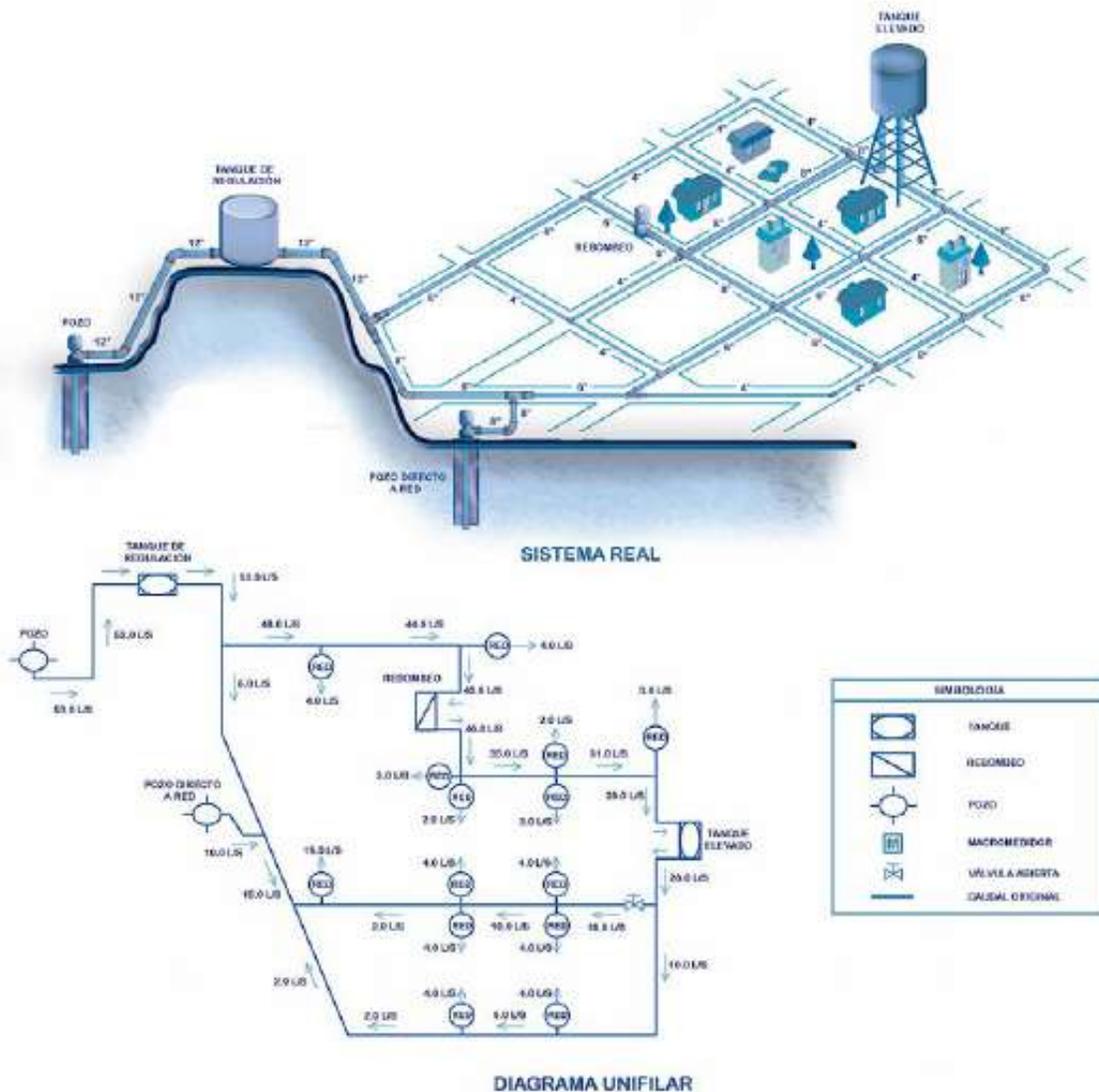


Figura 2-15. Diagrama unifilar del funcionamiento hidráulico de un sistema de agua potable.

Existen otros datos útiles sobre la operación hidráulica del sistema de agua potable, que se deberán recolectar en los registros históricos del organismo operador de agua y en las visitas de campo. Son estadísticas sobre:

- Número y tipo de conexiones domiciliarias.
- Ocurrencia y reparación de fugas.
- Estado físico y operativo de medidores.

Particularmente, se debe mostrar la conexión domiciliar típica del lugar y exponer su estado físico general. Asimismo, es necesario hacer una relación del número de conexiones domiciliarias conectadas a la red que están contabilizadas por el organismo operador y clasificarlas por uso, con y sin medidor funcionando.

En cuanto a la ocurrencia y reparación de fugas, es necesario que se elaboren las estadísticas históricas por año, para que se pueda observar las tendencias respectivas y la capacidad de mantenimiento de la red. Lo deseable es tener datos mensuales, clasificados de acuerdo al tipo de elemento en que se presenta la fuga, tipo de falla, gasto unitario de fuga, presión, tiempo de reparación, material del tubo y profundidad. Con los datos estadísticos se elaboran gráficos donde se pueda visualizar la magnitud del problema de fugas en el sistema de distribución de agua. Esta información será muy útil cuando se analice la disponibilidad del agua y se estime el volumen de fugas en el sistema de abastecimiento de agua.

Por lo que respecta a los medidores, se debe trabajar en dos rubros: a) macromedidores en obras de captación y b) micromedidores de usuarios. Por un lado, se obtiene una lista de los macromedidores instalados y se verifica en campo su estado físico y sus condiciones operativas. Es importante incluir también la fecha de instalación del medidor, tiempo de operación y periodo de la última prueba de exactitud que se realizó, ya que estos datos son utilizados en el cálculo de oferta de agua en el sistema y para la selección de nuevos equipos de medición. Por otro lado, se consulta en el área comercial del organismo operador del sistema los registros de micromedidores instalados en la red de agua. Es valioso que se conozca qué tipo de aparatos existen, fallas comunes, tiempo de vida útil y coberturas. Asimismo, se recomienda documentar los datos sobre pruebas de errores de exactitud realizadas en campo o en un banco de pruebas.

Con toda la información obtenida y analizada sobre la operación hidráulica del sistema, se completa el informe técnico que describe la infraestructura del sistema de agua potable en estudio (*inciso 2.3.1*), adicionando lo siguiente:

- Funcionamiento hidráulico general.
- Zonas y horarios de operación de la red.
- Conexiones domiciliarias.
- Ocurrencia de fugas.
- Medidores.
- Obras que se encuentren en proceso de diseño o construcción.

Este informe técnico es un documento que siempre formará parte del proceso de planeación de la sectorización de la red del sistema de agua potable y servirá como base para actividades de su desarrollo.

2.4 POBLACIÓN EN EL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

2.4.1 Comportamiento de la población

La población de una localidad es un factor determinante para la planeación, diseño y operación del sistema de abastecimiento de agua potable. Con el número de habitantes se definen los requerimientos del suministro de agua y por ende las capacidades de las obras del sistema. La ubicación y densidad geográfica de la población influye en la traza y dimensionamiento de la red y en la localización de la infraestructura de almacenamiento y rebombeo.

Por esta razón, se deben hacer estimaciones, lo más exactas posible, de la población existente, de su crecimiento y distribución futura. Esto no es fácil, porque el tamaño, densidad y distribución geográfica de la población dependen de circunstancias físicas, sociales, económicas y políticas; por ejemplo: avances en higiene y enfermedades, adelantos en medicina, fluctuaciones económicas, actividad comercial e industrial, disponibilidad de agua, topografía, inseguridad pública, clima, etc. En la *Figura 2-16* se muestra un esquema donde se indican los factores influyentes de la dinámica de la población.



Figura 2-16. Factores que influyen en el crecimiento de una población.

De no ser por estos factores, las curvas de crecimiento de las poblaciones seguirían una forma de “S” o sigmoide, característica del crecimiento de los seres vivos dentro de un espacio y oportunidad limitados, como se muestra en la *Figura 2-17*. La hipótesis principal de este modelo de crecimiento es que las poblaciones, a medida que crecen, tenderán a agotar los recursos del medio, este proceso llevará a un decremento de su tasa de multiplicación a fin de sobrevivir en ese medio; la escasez de espacio y recursos naturales produce la estabilización del tamaño de la población alrededor de un cierto punto, denominado Población Máxima, $P_{max} = K$. Aunque no existe ley universal, se ha demostrado que en muchas localidades del mundo el crecimiento demográfico, durante períodos de más de cincuenta años, se aproxima a esta curva de crecimiento.

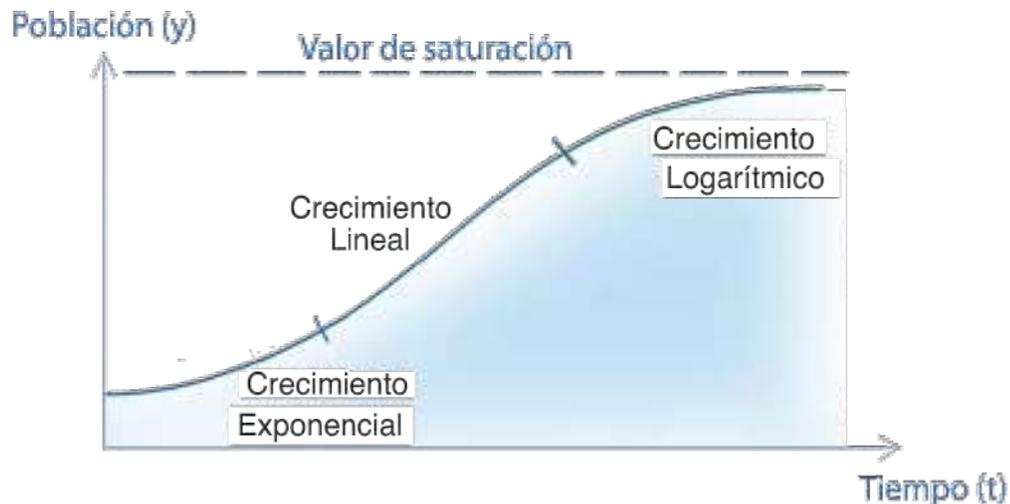


Figura 2-17. Curva característica de crecimiento de una población dentro de un espacio y oportunidad limitados.

Este modelo de crecimiento en forma de “S” se denomina “Logístico” y fue desarrollado por Pierre F. Verhulst, de nacionalidad belga, en 1838. En la primera etapa el crecimiento de la población es similar la curva de una ecuación exponencial, o sea:

$$P_t = ae^{bt} \quad (2.1)$$

Donde:

- P_t = Número de habitantes de la población, en el tiempo.
- a = Coeficiente obtenido a partir de valores históricos observables de población.
- b = Exponente calculado a partir de valores históricos observables de población.
- t = Unidad de tiempo.
- e = Base de los logaritmos naturales (2.7182...).

Los valores de “a” y “b” se obtienen a través de n valores históricos observables del tamaño de la población P_i en el tiempo t_i, aplicando las siguientes ecuaciones:

$$a = e^{\left(\frac{\sum \text{Ln}P_i - b \sum t_i}{n} \right)} \quad (2.2)$$

$$b = \frac{n \sum t_i \text{Ln}P_i - \sum t_i \sum \text{Ln}P_i}{n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} \quad (2.3)$$

En la teoría de estos modelos matemáticos, la forma de determinar el nivel de la estimación del coeficiente “a” y exponente “b” con valores observables, es mediante el coeficiente de correlación “r”, cuyo rango es de -1 a +1; conforme el valor absoluto de “r” se encuentre más cercano a uno, el nivel será mejor. El coeficiente de correlación para la curva exponencial se calcula con la ecuación siguiente:

$$r = \frac{n \sum t_i (\text{Ln} P_i) - \sum t_i \sum \text{Ln} P_i}{\sqrt{[n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2] \cdot [n \sum (\text{Ln} P_i)^2 - (\sum \text{Ln} P_i)^2]}} \quad (2.4)$$

Ejemplo)

Determinar la ecuación de ajuste exponencial y el coeficiente de correlación respectivo del crecimiento histórico de población mostrada en el Cuadro 2-7 y estimar el número de habitantes que se tendrán en el año 2024; graficar los resultados:

Cuadro 2-7. Datos de población del ejemplo.

Tiempo t_i	Año	Población P_i
0	1990	4,716
5	1995	7,274
10	2000	9,496
15	2005	14,245
20	2010	26,318

Solución)

Para realizar la regresión exponencial se calculan los parámetros mostrados en el Cuadro 2-8 y las sumatorias de cada columna:

Cuadro 2-8. Datos de cálculo de población del ejemplo.

Tiempo t_i	Año	Población P_i	$\text{Ln } P_i$	t_i ($\text{Ln} P_i$)	$(t_i)^2$	$\text{Ln } (P_i)^2$
0	1990	4,716	8.459	0	0	71.550
5	1995	7,274	8.892	44.460	25	79.069
10	2000	9,496	9.159	91.586	100	83.880
15	2005	14,245	9.564	143.462	225	91.473
$n=5$	20	2010	10.178	203.560	400	103.592
Sumatoria	50		46.252	483.069	750	429.564

Sustituyendo en las ecuaciones 2.2 a 2.4, se obtienen los coeficientes a , b y r :

$$b = \frac{n \sum t_i \text{Ln} P_i - \sum t_i \sum \text{Ln} P_i}{n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} = \frac{5 \times 483.069 - 50 \times 46.252}{5 \times 750 - (50)^2} = 0.08221$$

$$a = e^{\left(\frac{\sum \text{Ln} P_i - b \sum t_i}{n} \right)} = e^{\left(\frac{46.252 - 0.08221 \times 50}{5} \right)} = 4,574.158$$

$$r = \frac{n \sum t_i (\text{Ln} P_i) - \sum t_i \sum \text{Ln} P_i}{\sqrt{[n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2] \cdot [n \sum (\text{Ln} P_i)^2 - (\sum \text{Ln} P_i)^2]}} = \frac{5 \times 483.069 - 50 \times 46.252}{\sqrt{[5 \times 750 - 50^2] \cdot [5 \times 429.564 - 46.252^2]}} = 0.9905$$

Por lo que la ecuación de ajuste exponencial es:

$$P_t = ae^{bt} = 4,574.158 e^{0.08221 t}$$

Entonces la población estimada en el año 2024 ($t_i=20+14=34$) será:

$$P_{2024} = ae^{bt} = 4,574.158 e^{0.08221 \times 34} = 74,865 \text{ hab}$$

Y la gráfica respectiva se presenta en la Figura 2-18:

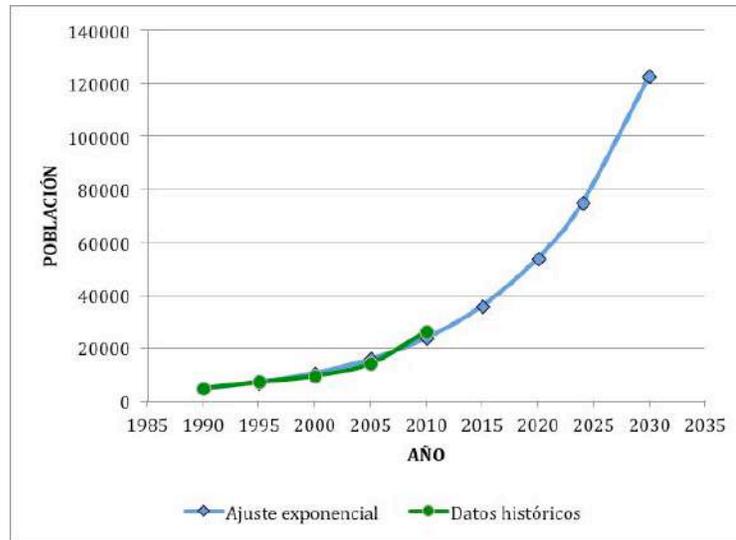


Figura 2-18. Ajuste exponencial del crecimiento de la población del ejemplo.

En la segunda fase de la curva sigmoide, el crecimiento de la población en el tiempo tiene un comportamiento como el de una ecuación lineal, es decir:

$$P_t = a + bt \quad (2.5)$$

En donde los valores de “a” y “b” se calculan también con los “n” valores observables de población histórica P_i en el tiempo t_i , como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$a = \frac{\sum P_i - b \sum t_i}{n} \quad (2.6)$$

$$b = \frac{n \sum t_i P_i - \sum t_i \sum P_i}{n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} \quad (2.7)$$

Y el coeficiente de correlación se determina con:

$$r = \frac{n \sum t_i P_i - \sum t_i \sum P_i}{\sqrt{[n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2] \cdot [n \sum P_i^2 - (\sum P_i)^2]}} \quad (2.8)$$

Numéricamente, la aplicación de las ecuaciones 2.6 a 2.8 se realiza de manera similar al ejemplo del ajuste exponencial.

En la última etapa de la curva “S”, el crecimiento de la población decrecerá en la forma de una ecuación logarítmica, esto es:

$$P_t = a + bLnt \quad (2.9)$$

Donde “a” “b” y “r” se calculan con las ecuaciones siguientes:

$$a = \frac{\sum P_i - b \sum Lnt_i}{n} \quad (2.10)$$

$$b = \frac{n \sum (Lnt_i) P_i - \sum Lnt_i \sum P_i}{n \sum (Lnt_i)^2 - (\sum Lnt_i)^2} \quad (2.11)$$

$$r = \frac{n \sum (Lnt_i) P_i - \sum Lnt_i \sum P_i}{\sqrt{[n \sum (Lnt_i)^2 - (\sum Lnt_i)^2] \cdot [n \sum P_i^2 - (\sum P_i)^2]}} \quad (2.12)$$

Numéricamente, el ajuste logarítmico se realiza siguiendo un procedimiento similar al del ejemplo numérico del ajuste exponencial.

La ecuación completa que describe el modelo logístico de Verhulst fue introducida por Raymond Pearl en 1920, como sigue:

$$P_t = \frac{K}{1 + be^{-at}} \quad (2.13)$$

Donde los parámetros K, a y b, se obtienen de tres valores históricos observables de población, P_i , P_{i+1} y P_{i+2} en los tiempos t_i , t_{i+1} y t_{i+2} , equidistantes en un lapso $T = t_{i+1} - t_i = t_{i+2} - t_{i+1}$, con las ecuaciones siguientes (la letra “e” es la base de logaritmos naturales = 2.7182...):

$$e^{-aT} = \frac{P_i(P_{i+2} - P_{i+1})}{P_{i+2}(P_{i+1} - P_i)} \quad (2.14)$$

$$a = \frac{Ln \left[\frac{P_i(P_{i+2} - P_{i+1})}{P_{i+2}(P_{i+1} - P_i)} \right]}{-T} \quad (2.15)$$

$$K = \frac{(e^{-aT} - 1)P_i P_{i+1}}{P_{i+1}e^{-aT} - P_i} \quad (2.16)$$

$$b = \frac{K}{P_i} - 1 \quad (2.17)$$

Los valores de P_i , P_{i+1} y P_{i+2} se eligen de la serie histórica de valores de población y en los cálculos se hace $t_i = 0$, que debe coincidir con un valor del año donde crece la población en forma lenta (crecimiento exponencial); la elección de los otros dos valores t_{i+1} y t_{i+2} , se debe sujetar a los años en que la serie histórica demuestra crecimientos rápidos, o sea, en la parte rápidamente ascendente, para que se denote la tendencia del modelo logístico.

Ejemplo)

Determinar la ecuación de ajuste logístico del crecimiento histórico de población mostrada en el Cuadro 2-9, obtener los errores relativos de correlación y estimar el número de habitantes en el año 2027; graficar los resultados:

Cuadro 2-9, Datos de población del ejemplo de ajuste logístico.

Tiempo t_i	Año	Población P_i
0	1950	3,900
10	1960	8,005
20	1970	14,800
30	1980	25,345
40	1990	36,100
50	2000	41,930
60	2010	44,812

Solución)

El ajuste de la ecuación logística exige la selección de tres valores históricos, separados en lapsos iguales; por lo tanto, se toman los siguientes datos:

Cuadro 2-10. Elección de datos históricos del ejemplo de ajuste logístico.

Tiempo (t_i)	Año	Población histórica (P_i)
$t_0 = 0$	1,960	$P_0 = 8,005$
$t_1 = 20$	1,980	$P_1 = 25,345$
$t_2 = 40$	2,000	$P_2 = 41,930$

Entonces $T = 20 - 0 = 40 - 20 = 20$. Sustituyendo esta serie de datos en las ecuaciones 2.14 a 2.17 se obtiene el valor de los coeficientes a , b y K , esto es:

$$e^{-aT} = \frac{P_i(P_{i+2} - P_{i+1})}{P_{i+2}(P_{i+1} - P_i)} = \frac{8,005 \times (41,390 - 25,345)}{41,390 \times (25,345 - 8,005)} = 0.1826$$

$$a = \frac{\text{Ln} \left[\frac{P_i(P_{i+2} - P_{i+1})}{P_{i+2}(P_{i+1} - P_i)} \right]}{-T} = \frac{\text{Ln}(0.1826)}{-20} = 0.085$$

$$K = \frac{(e^{-aT} - 1)P_i P_{i+1}}{P_{i+1}e^{-aT} - P_i} = \frac{(0.1826 - 1) \times 8,005 \times 25,345}{25,345 \times 0.1826 - 8,005} = 49,108.8$$

$$b = \frac{K}{P_i} - 1 = \frac{49,108.8}{8,005} - 1 = 5.135$$

Por lo que la ecuación de ajuste logístico será:

$$P_t = \frac{K}{1 + be^{-at}} = \frac{49,108.8}{1 + 5.135e^{-0.085t}}$$

Los errores relativos de correlación se obtienen para cada año histórico, mediante la fórmula siguiente:

$$Error_{relativo} = \frac{P_{i, estimada} - P_{i, histórica}}{P_{i, histórica}} \times 100$$

Sustituyendo para cada año, se obtienen los valores del Cuadro 2-11:

Cuadro 2-11. Cálculo de error relativo del ajuste logístico del ejemplo.

Tiempo t_i	Año	Población $P_{i,Histórica}$	Población estimada $P_{i,estimada}$	Error relativo (%)
-10	1950	3,900	3,773	-3.3%
0	1960	8,005	8,005	0.0%
10	1970	14,800	15,374	3.9%
20	1980	25,345	25,345	0.0%
30	1990	36,100	35,061	-2.9%
40	2000	41,930	41,930	0.0%
50	2010	44,812	45,761	2.1%

Nota: Se observa que el tiempo t_0 corresponde al año base 1960, entonces para el año 1950, $t(-1) = -10$

Los resultados se muestran en la Figura 2-19.

Finalmente, para estimar la población en el año 2027, se sustituye $t = 2,027 - 1,960 = 67$, resultando una población estimada de:

$$P_{67} = \frac{49,108.8}{1 + 5.135e^{-0.085 \times 67}} = 48,276 \text{ hab}$$

La información más confiable sobre la población de una comunidad en un tiempo designado se obtiene mediante un censo oficial bien conducido. En México existen censos y conteos históricos de población publicados cada diez y cinco años, respectivamente, por el INEGI. Estos datos son útiles para observar el crecimiento histórico de la población, realizar cálculos intercensales, o bien, para hacer apreciaciones postcensales a corto plazo. Para la planeación y diseño de obras de agua potable, se requiere conocer la población en el futuro en plazos más largos.

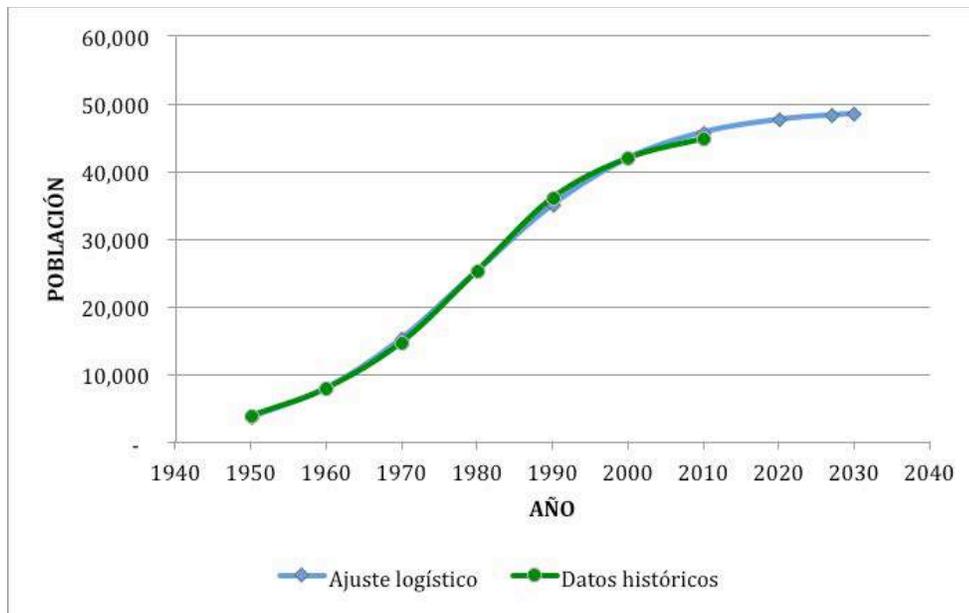


Figura 2-19. Ajuste logístico del crecimiento de la población del ejemplo.

Dada la complejidad multidisciplinaria del crecimiento de la población, para su pronóstico en periodos futuros largos la Conagua, ha publicado, en el año 2001, la norma NT-011-CNA-2001, relativa a Métodos de Proyección de Población para proyectos hidráulicos urbanos, por lo que se recomienda su consulta y seguimiento. Asimismo, el Consejo Nacional de Población (Conapo), emite estadísticas y proyecciones futuras de población, que deberán ser consideradas en los análisis. La normatividad en muchos países exige para los estudios de agua potable, en general, la proyección de la población a un determinado número de años mediante la aplicación de métodos de proyección definidos por las instituciones oficiales, por lo que es muy importante que se tome en cuenta esa normatividad.

Como se mencionó, en el desarrollo de los sistemas de agua potable es necesario, por un lado, estimar el tamaño de la población para calcular la cantidad de agua que debe ser producida en las captaciones, y, por otro, establecer su distribución espacial para definir la traza de la red de tuberías y la ubicación de los tanques y rebombes. Esta situación deriva en una estrategia de actuación en la proyección de la población de una localidad, con dos etapas de estudio que se detallan en los siguientes incisos.

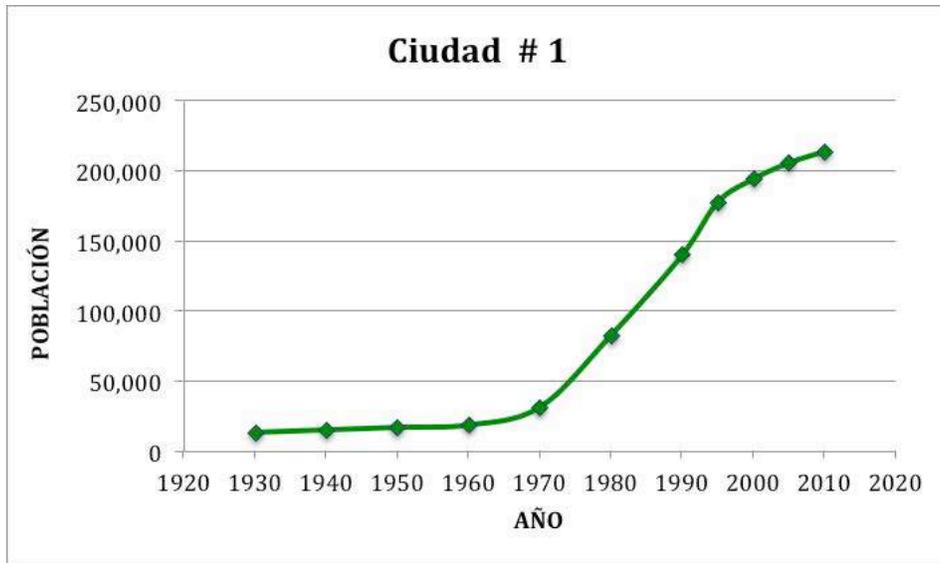
2.4.2 Proyección del tamaño de la población

La estimación del tamaño de la población, con fines de planeación y diseño de sistemas de agua potable, se realiza aplicando los modelos matemáticos descritos antes, basados en valores observados de crecimiento histórico. El procedimiento específico de cálculo se fundamenta en las experiencias internacionales reportadas a la fecha y en los siguientes criterios metodológicos:

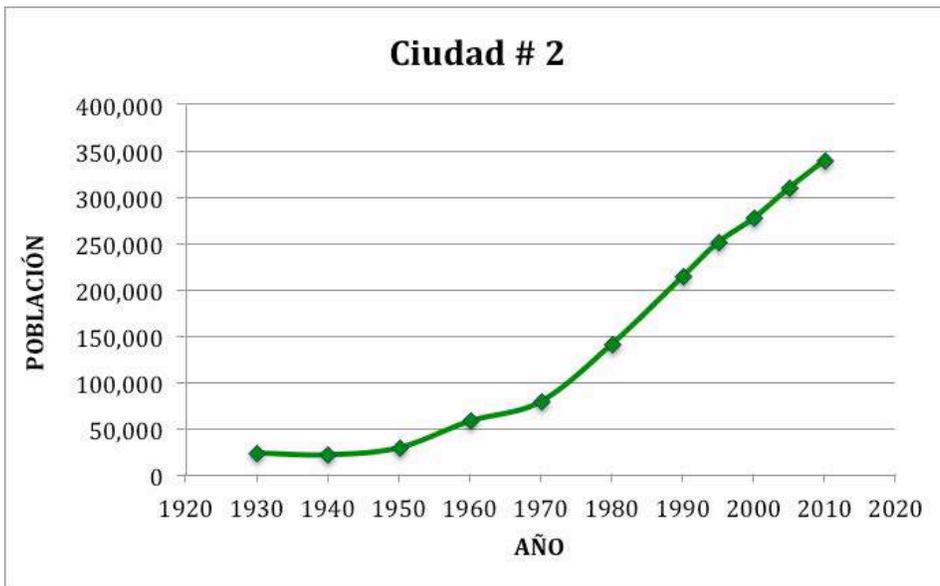
a) En primer lugar, se debe conseguir la mayor cantidad de datos censales, con el objeto de observar en un largo plazo el registro completo del crecimiento de la población e identificar si hay una tendencia con la forma de la curva “S”, y en qué punto de ella se encuentra el tiempo presente.

Ejemplo)

En la Figura 2-20 se muestran los datos desde el año de 1930 al 2010, obtenidos de dos ciudades mexicanas, con diferentes condiciones físicas, sociales y económicas.



a. Datos censales de población en una localidad mexicana, con registros históricos de largo plazo, del ejemplo.



b. Datos censales de población en otra localidad mexicana, con registros históricos de largo plazo, del ejemplo.

Figura 2-20. Datos censales de población en una localidad mexicana, con registros históricos de largo plazo, del ejemplo.

Como se observa, en las dos localidades existe un comportamiento en forma de “S” en el crecimiento histórico de la población. En la ciudad # 2 se nota que el crecimiento actual de la población está en la etapa lineal; mientras que en la ciudad # 1 está llegando a su nivel de saturación, por lo que es de esperar que el número de habitantes se incremente muy poco, se estabilice, o incluso comience a disminuir.

b) El siguiente paso es realizar un ajuste de los datos históricos a una ecuación de tipo logística, como la presentada por Raymond y Pearl (ecuación 2.13), si el tamaño de la población actual se encuentra en la curva de crecimiento exponencial o lineal y si la proyección es para más de 15 años; o bien, aplicar un ajuste parcial de tipo exponencial (ec. 2.1), lineal (ec. 2.5) o logarítmico (ec. 2.9), dependiendo del punto donde se encuentre el crecimiento actual de la población de la localidad en estudio, si el objetivo es hacer una proyección menor a 15 años. Cuando se realizan ajustes parciales (exponencial, lineal o logarítmico) de la curva de crecimiento de la población, es recomendable utilizar solamente los últimos cuatro o cinco datos históricos para evitar dispersiones importantes en la ecuación obtenida y reducir los errores de aproximación, mientras que en el ajuste logístico se explorarán todos los datos censales históricos disponibles.

Ejemplo)

Determinar la población de las localidades mexicanas del ejemplo anterior, para los años 2020 y 2040.

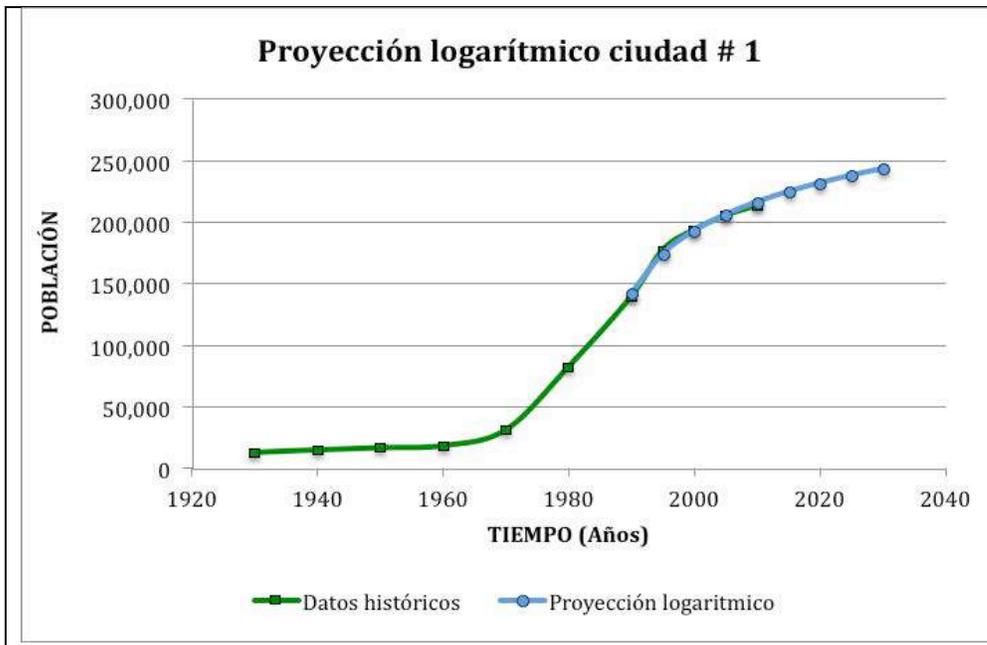
Solución)

En la proyección de población a corto plazo de la ciudad # 1, que está llegando a su nivel de saturación conviene realizar un ajuste logarítmico, mientras que en el caso de la # 2 uno de tipo lineal; en estos ajustes parciales se utilizan solo datos históricos del año 1990 al 2010. Para las proyecciones de población a largo plazo, se hace el ajuste logístico solamente en la ciudad # 2, considerando los datos desde el año 1930 al 2010 para elegir los tres valores requeridos en la determinación de los parámetros a, b y K. En la ciudad # 1 se utiliza la misma ecuación de ajuste logarítmico que resultó en la proyección de corto plazo. Los resultados numéricos de los ajustes y proyecciones de corto y largo plazo se muestran en las Figura 2-21 y Figura 2-22, respectivamente.

Tiempo (ti)	Año	Población histórica (Pi)	Población estimada	Error en estimación (%)
1	1990	140,268	142,733	1.76%
2	1995	178,096	174,488	-2.03%
3	2000	194,463	193,064	-0.72%
4	2005	206,005	206,243	0.12%
5	2010	214,162	216,466	1.08%

a =	1.427E+05
b =	4.581E+04
r =	0.99613

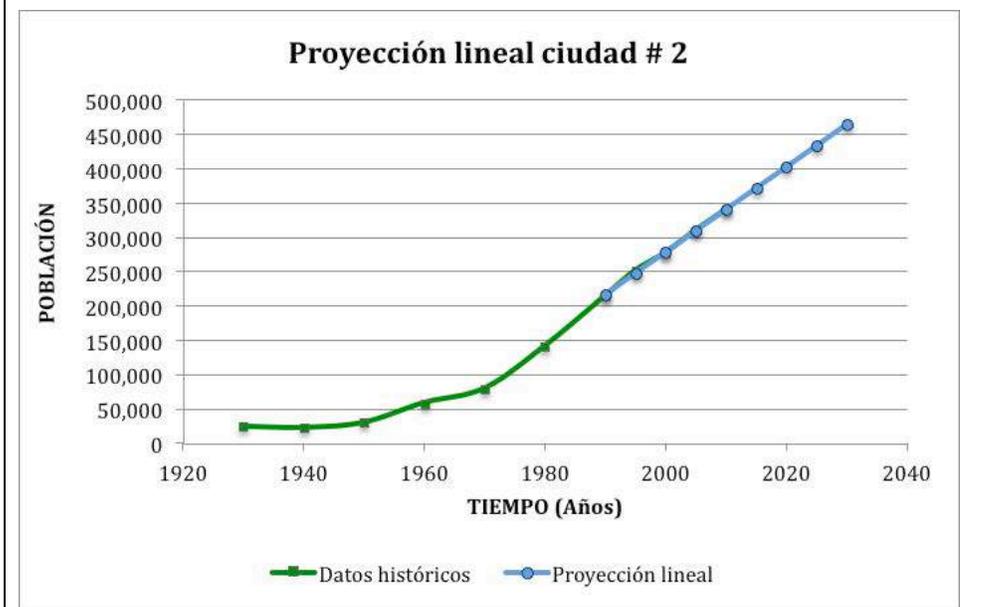
$$P_i = 142,700 + 45,810 \ln(t_i)$$



a. Resultado de ajuste logarítmico de población de corto plazo y proyección, del ejemplo.

Tiempo (ti)	Año	Población histórica (Pi)	Población estimada	Error en estimación (%)
1	1990	214,856	217,076	1.03%
2	1995	251,724	248,051	-1.46%
3	2000	277,750	279,026	0.46%
4	2005	310,413	310,001	-0.13%
5	2010	340,387	340,976	0.17%

a=	186,100.70
b=	30,975.10
r=	0.99893

$$P_i = 186,100.7 + 30,975.1 (t_i)$$


b. Resultado de ajuste lineal de población de corto plazo y proyección, del ejemplo.

Figura 2-21. Resultado de ajuste logarítmico y lineal de población de corto plazo y proyección, del ejemplo.

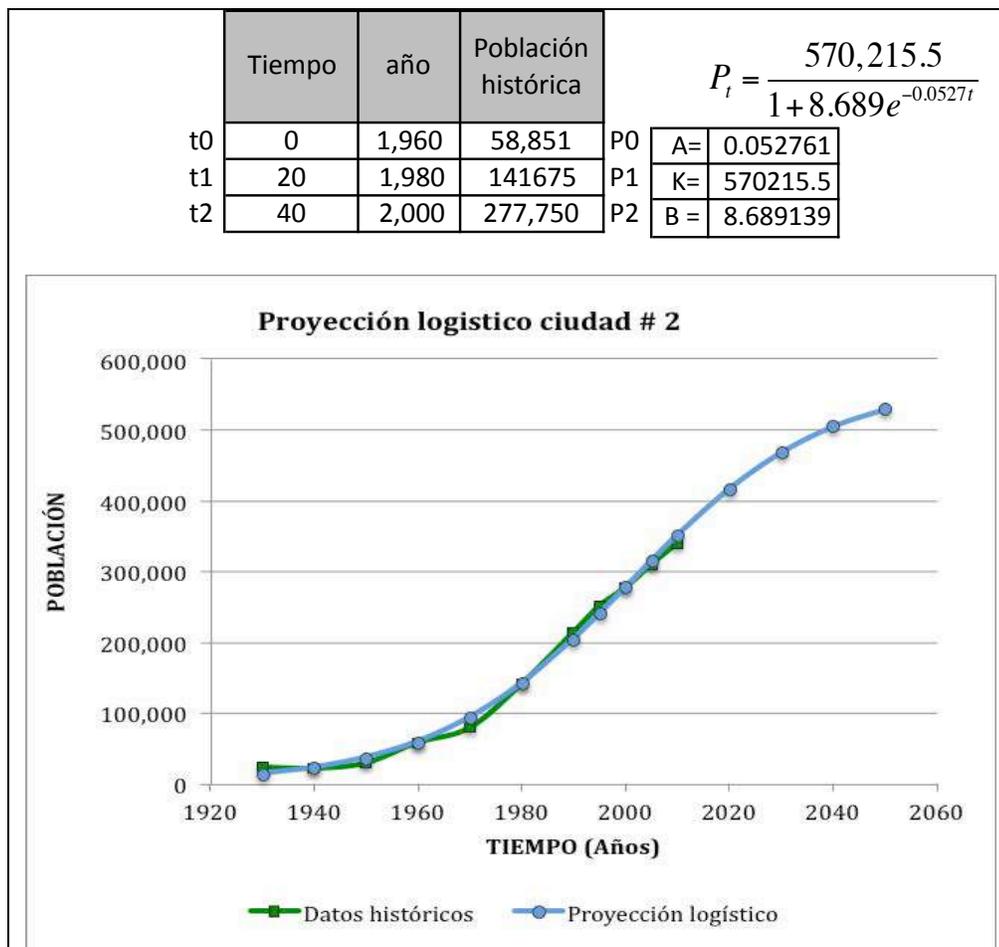


Figura 2-22. Resultado de ajuste logístico de población de largo plazo y proyección, del ejemplo.

En la ciudad # 2, la estimación de la población para el corto plazo, año 2020, se calcula con la ecuación lineal de la Figura 2-21, para un tiempo $t_{2020} = 1 + (2020 - 1990) / 5 = 7$; en cambio, para el largo plazo, año 2040, se utiliza la ecuación logística de la Figura 2-22 con un tiempo $t_{2040} = 2040 - 1960 = 80$, o sea:

$$P_{2020} = 186,100.7 + 30,975 \times 7 = 402,926 \text{ hab}$$

$$P_{2040} = \frac{570,215.5}{1 + 8.689e^{-0.0527 \times 80}} = 505,408 \text{ hab}$$

Para el cálculo de las poblaciones en la ciudad # 1, para los años 2020 y 2040, se utiliza la misma expresión obtenida en el ajuste logarítmico (ver Figura 2-21), esto es:

$$P_{2020} = 142,700 + 45,810 \times \ln(7) = 231,842 \text{ hab}$$

$$P_{2040} = 142,700 + 45,810 \times \ln(11) = 252,548 \text{ hab}$$

c) Cuando se presenten casos donde el crecimiento poblacional histórico de una ciudad no sigue un patrón definido, como el que se ha presentado, lo recomendable es hacer el ajuste y proyección con el

método de mínimos cuadrados (potencial o polinomial) y seleccionar el que arroje el coeficiente de correlación más cercano a la unidad (Ref. 2.1); o bien, realizar el ajuste y la proyección por medio de extensión gráfica.

d) Como paso final, en seguida se procede a realizar algunas precisiones en la proyección de la población estimada con los ajustes matemáticos, de la siguiente manera:

d.1. Por tomas domiciliarias viables.- Todas las localidades tienen una capacidad límite de lotificación de predios domésticos, que tarde o temprano serán habitados y dispondrán de una toma domiciliaria de agua potable. En este contexto, además de las tomas domiciliarias existentes, hay un número de tomas de agua viables de ser incorporadas a la red de distribución, que mediante un mapa de información geográfica catastral pueden ser contabilizadas. Con esta información y el índice de hacinamiento estadístico de la ciudad (habitantes por vivienda), se puede determinar el número de habitantes que ocuparán dichos predios domésticos; obviamente, este tamaño de población corresponde con la de saturación de la localidad en estudio, es decir, es igual al valor del coeficiente K en la curva logística. Determinado K , entonces, se calculan los coeficientes a y b con las siguientes ecuaciones:

$$b = \frac{K - P_i}{P_i} \quad (2.18)$$

$$a = - \frac{\text{Ln} \left[\left(\frac{K}{P_{i+1}} - 1 \right) \frac{1}{b} \right]}{T} \quad (2.19)$$

Donde P_i y P_{i+1} son poblaciones históricas en los tiempos t_i y t_{i+1} , equidistantes en un lapso $T = t_{i+1} - t_i$.

Y finalmente, se hace una precisión de la ecuación de la curva logística con la ecuación 2.13.

Ejemplo)

En la ciudad # 2 se determinó que el número de tomas domiciliarias de saturación es de 176,314 unidades y el índice de hacinamiento es de 3.82 habitantes por vivienda, según el mapa de información geográfica mostrado en la Figura 2-23. Determinar el tamaño de la población de saturación, precisar la ecuación de la curva logística obtenida en el ejemplo anterior y calcular la población del año 2040.

Solución)

El valor de K se obtiene multiplicando el número de tomas domiciliarias de saturación por el índice de hacinamiento de la ciudad:

$$K = 176,314 \text{ tomas} \times 3.82 \text{ hab / toma} = 672,859 \text{ hab}$$

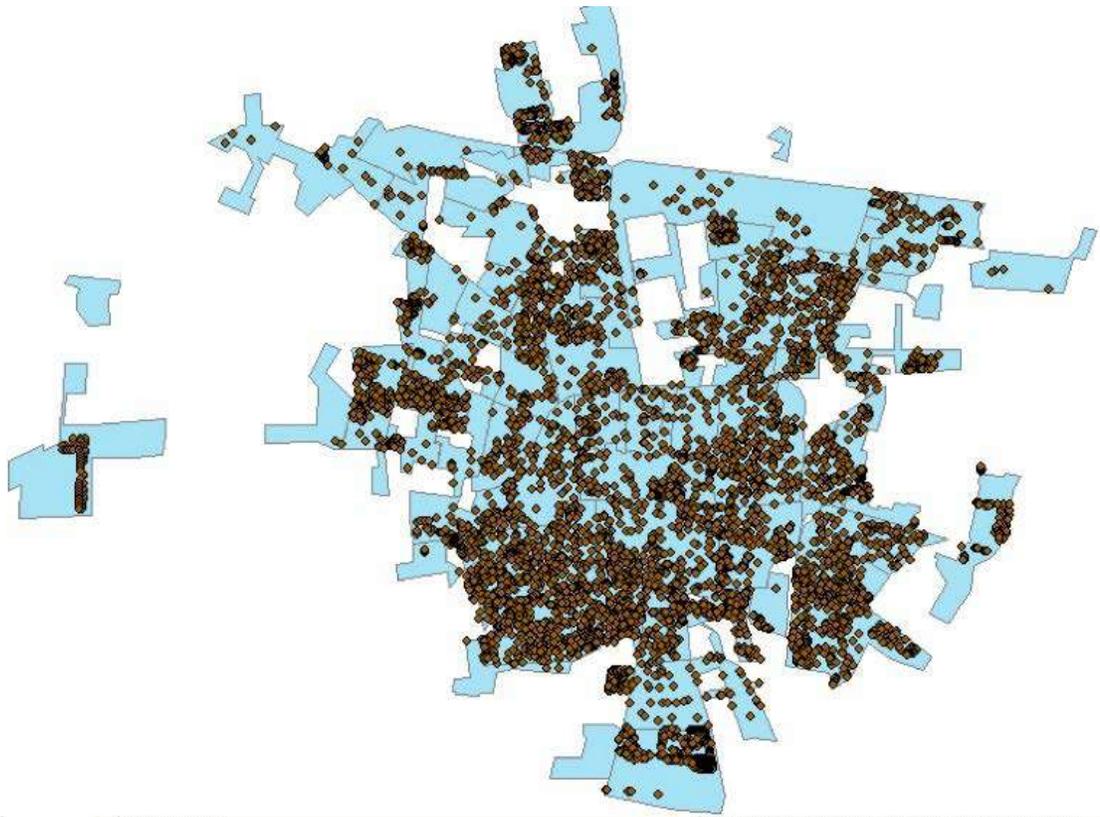


Figura 2-23. Ubicación de tomas domiciliarias domésticas de la ciudad # 2 en un sistema de información geográfica.

NOTA: En este mapa de información geográfica, los puntos oscuros son las tomas domiciliarias domésticas existentes y viables del sistema de agua de la ciudad.

Los coeficientes a y b se obtienen al sustituir los valores de K , P_0 y P_1 en las ecuaciones 2.18 y 2.19, resultando:

$$b = \frac{K - P_0}{P_0} = \frac{672,859 - 58,851}{58,851} = 10.433$$

$$a = -\frac{\text{Ln}\left[\left(\frac{K}{P_1} - 1\right)\frac{1}{b}\right]}{T} = -\frac{\text{Ln}\left[\left(\frac{672,859}{141,675} - 1\right)\frac{1}{10.433}\right]}{20} = 0.05117$$

Y la ecuación 2.13 de ajuste logístico queda:

$$P_t = \frac{672,859}{1 + 10.433e^{-0.05117t}}$$

En lugar de la original calculada en el ejemplo anterior:

$$P_t = \frac{570,215.5}{1 + 8.689e^{-0.0527t}}$$

Luego entonces, la población estimada para el año 2040 será:

$$P_{2040} = \frac{672,859}{1 + 10.433e^{-0.05117 \times 80}} = 573,127 \text{ hab}$$

d.2. Por crecimiento negativo poblacional.- En aquellas localidades donde se ha observado en los últimos años una tendencia clara de crecimientos poblacionales negativos, debe suponerse que la localidad ya se ha saturado y no puede crecer más, a menos de que sucediera un evento social, económico o político extraordinario que cambie esta situación.

Para determinar la población a utilizar en la planeación y diseño de obras hidráulicas, es menester recordar que todo proyecto de ingeniería de abastecimiento de agua potable se calcula para que las obras se saturen en un periodo futuro. Normalmente, en las ciudades la población actual es menor que la población futura, por lo tanto las obras hidráulicas estarán sobredimensionadas al término de su construcción y alcanzarán su capacidad operacional al final del periodo establecido.

Entonces, al contrario de los proyectos comunes donde la población crece con el tiempo, si se construyen obras de abastecimiento de agua potable en localidades con la población futura menor que la actual, dichas obras quedarán subdimensionadas cuando sean construidas y no tendrán suficiente capacidad para satisfacer de agua a los usuarios actuales.

Por lo tanto, para las localidades donde la población está decreciendo no es necesaria la proyección a futuro con métodos matemáticos. Para efectos de planeación y diseño del sistema de abastecimiento de agua potable, debe tomarse el valor de la población actual.

Ejemplo)

Las estadísticas de censos y conteos de población histórica de una zona de la ciudad de México, mostrados en el Cuadro 2-12 , indican una tendencia decreciente en los últimos 15 años, hasta el año actual 2010. Graficar los datos observados de población y determinar la población futura en el año 2025 que se debe aplicar para el diseño de la red de agua potable.

Cuadro 2-12. Datos de población observados en una zona de la ciudad de México, en el ejemplo.

<i>Año</i>	<i>Población</i>	<i>Tasa de Crecimiento</i>
1950	392,697	---
1960	949,904	9.24%
1970	1,720,661	6.12%
1980	2,114,884	2.08%
1990	1,742,756	-1.92%
1995	1,712,044	-0.35%
2000	1,676,550	-0.42%
2005	1,618,459	-0.70%
2010	1,600,483	-0.22%

Solución)

La gráfica de crecimiento de población se muestra en la Figura 2-24., donde se aprecia que ha estado disminuyendo a partir del año de 1980.

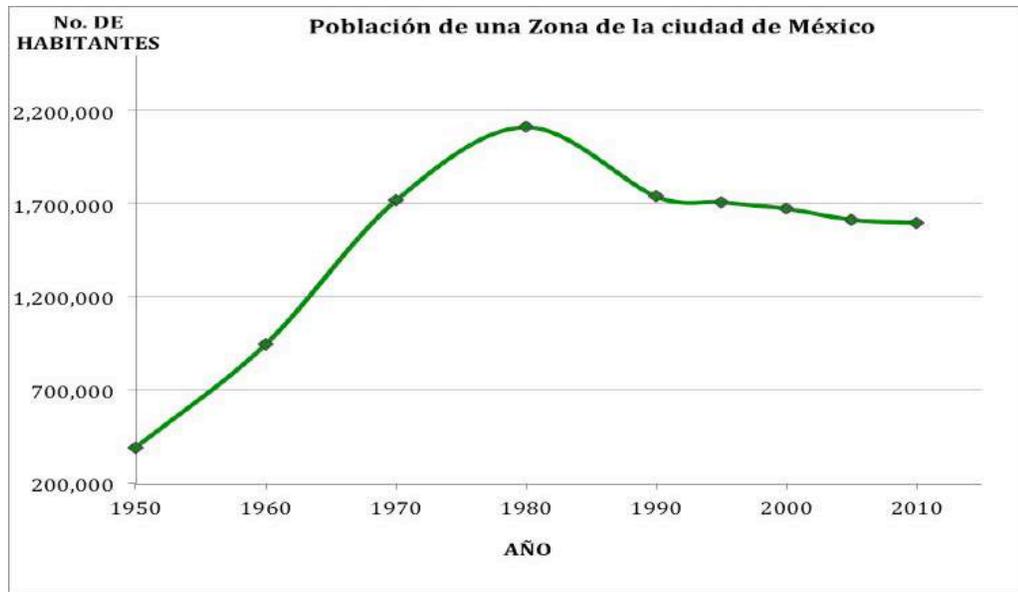


Figura 2-24. Datos de población observados en una zona de la ciudad de México, en el ejemplo.

Entonces, la población para el diseño de la red de agua potable para el año 2025 será la correspondiente al año actual 2010, es decir igual a 1,600,483 habitantes, puesto que las obras estarán saturadas hidráulicamente cuando sean construidas.

d.3. Por crecimiento extraordinario.- Es necesario consultar en los planes estatales y municipales si existe algún desarrollo o evento extraordinario que pueda cambiar la tendencia del crecimiento de población, y ajustar los datos proyectados en función de los valores que se prevén en dichos planes.

Existen otros métodos de estimación de la población futura, como el Modelo de Componentes, que se basa en proyecciones parciales de las variables demográficas, por sexo, edad, muertes, nacimientos, migración, etc. No obstante, su aplicación se encuentra supeditada a la disponibilidad de información confiable de la localidad en estudio, por lo que requieren estudios muy detallados, laboriosos y costosos. En la planeación y diseño de obras de abastecimiento de agua potable es suficiente aproximación la utilización de los métodos expuestos antes.

2.4.3 Estimación de la distribución espacial de la población

El cálculo de los valores espaciales de población por zonas de la ciudad es determinante para la ubicación de los rebombes y tanques, y en el trazo y dimensión de la red de distribución. Cuando se trata de proyectos de abastecimiento de agua potable con redes sectorizadas, las zonas de la ciudad para la distribución de población serán precisamente los sectores de la red.

Es necesario hacer un estudio profundo de las áreas de crecimiento de la ciudad, para lo cual se deberá consultar los planes de desarrollo existentes sobre la ciudad o localidad en cuestión. En las nuevas áreas de crecimiento, se elaborará una planeación de sectores para que en el futuro sean incorporados al sistema de agua potable.

Entonces, una vez determinado el valor del tamaño de la población, se debe calcular cómo se distribuye espacialmente en la localidad en estudio, específicamente en cada uno de los sectores de la red actual y de crecimiento futuro de la ciudad.

El procedimiento depende de la información de densidad de población en las zonas, colonias, fraccionamientos y desarrollos habitacionales de la ciudad. En la actualidad, estos datos se obtienen en instituciones oficiales. En México, a través del INEGI, se publican cada cinco años mapas geográficos con datos por áreas de población, llamadas “Áreas geostatísticas básicas” (Ageb), como los mostrados en la *Figura 2-25*.



Figura 2-25. Muestra de Ageb publicados por INEGI, con valores de población.

Fuente: INEGI, 2010.

Estos datos y áreas se exportan a un sistema de información geográfica (SIG), para consulta y cálculo de poblaciones en zonas de la ciudad que incluyan varios Ageb, como se muestra en la *Figura 2-26*.

El cálculo del tamaño espacial de poblaciones para las zonas de interés en la planeación y diseño del sistema de agua potable se realiza empalmado los Ageb con un mapa de dichas zonas de estudio o sectores. Entonces, se contabiliza el número de habitantes de los Ageb que pertenecen a cada zona; esto se realiza de manera proporcional al área que cubre el Ageb en la zona de estudio; o sea, si el Ageb está totalmente dentro de la zona el porcentaje de población será 100% de su población; si un Ageb se encuentra empalmado con dos o más zonas de estudio, se obtiene el porcentaje parcial para cada zona calculado en proporción al área del Ageb.



Figura 2-26. Vista en planta de los Ageb con valores de población, exportados a un SIG de una zona de la ciudad de México.

Una vez determinado el número de habitantes actual en cada sector que fue definido en la planeación y diseño del sistema de agua potable, se realiza una proyección a futuro, aplicando en forma proporcional el valor de población obtenido en tiempo presente, al número total de la población futura de la ciudad, obtenido este último con alguno de los métodos descritos en el inciso anterior.

Ejemplo)

Determinar el número de habitantes que se estima tener en el año 2028 en cada ZONA de operación de la ciudad mostrada en la Figura 2-27. La información sobre población que se obtuvo en las Ageb del censo en al año actual 2013 se presenta en la Figura 2-28. El tamaño de la población futura total en el año 2028 se estimó en 23,564 habitantes.

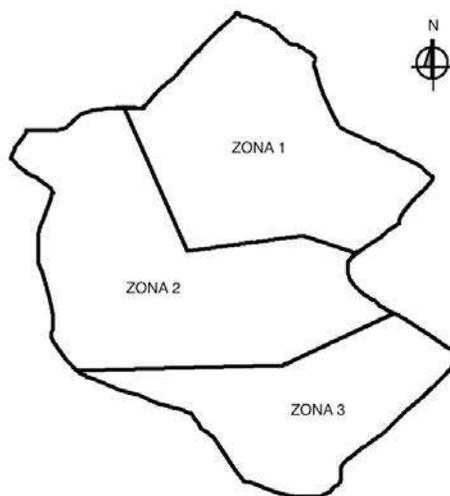


Figura 2-27. Zonas de operación de localidad del ejemplo.

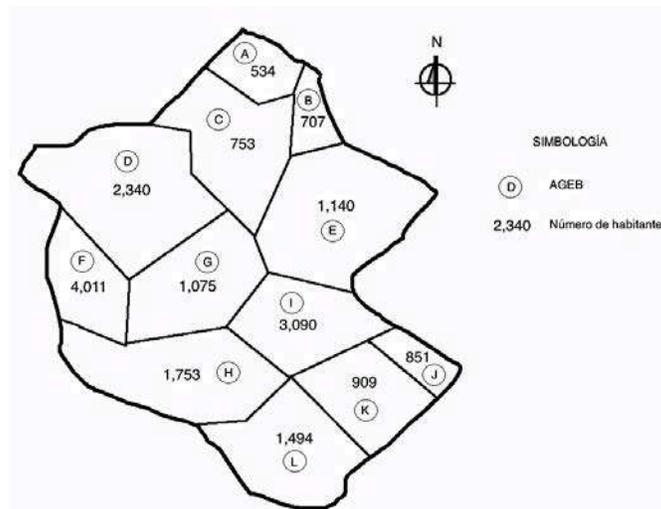


Figura 2-28. Ageb de la ciudad del ejemplo con el número de habitantes.

Solución)

El primer paso es empalmar los Ageb con las ZONAS de operación y determinar los porcentajes que cada zona incluye de cada Ageb, lo cual se muestra en la Figura 2-29.

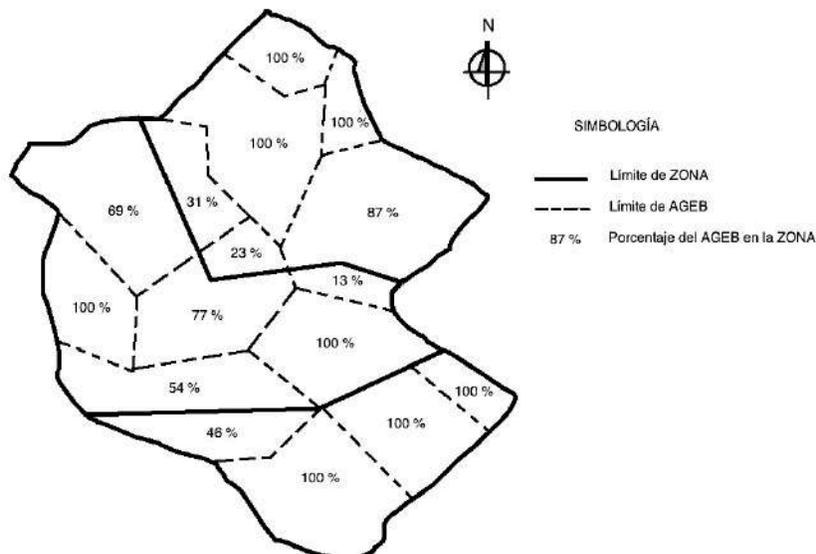


Figura 2-29. Zonas de operación empalmadas con los Ageb.

Entonces se determina la población de cada zona, multiplicando el valor del porcentaje por el número de habitantes de cada AGEB y luego se suman para obtener el total de población en la zona. En el Cuadro 2-13 se muestran los resultados de este cálculo.

Cuadro 2-13. Resultados del cálculo de población de cada zona de operación del ejemplo.

Zona	Ageb	Población Ageb	Porcentaje	Población zona	Población zona (redondeo)
I	A	534	100	534.0	534
	B	707	100	707.0	707

Zona	Ageb	Población Ageb	Porcentaje	Población zona	Población zona (redondeo)
	C	753	100	753.0	753
	D	2,340	31%	725.4	725
	E	1,140	87%	991.8	992
	G	1,075	23%	247.3	247
	SUMA			3,958.5	3,958
2	D	2,340	69%	1,614.6	1,615
	E	1,140	13%	148.2	148
	F	4,011	100	4,011.0	4,011
	G	1,075	77%	827.8	828
	H	1,753	54%	946.6	947
	I	3,090	100	3,090.0	3,090
	SUMA			10,638.2	10,639
3	H	1,753	46%	806.4	806
	J	851	100	851.0	851
	K	909	100	909.0	909
	L	1,494	100	1,494.0	1,494
	SUMA			4,060.4	4,060
			TOTAL	18,657.0	18,657

Las poblaciones de cada zona de operación para el año 2028 se obtienen extrapolando proporcionalmente el número actual de habitantes con la población futura igual a 23,564, resultando los siguientes valores:

$$P_{2028-ZONA 1} = \frac{3,958}{18,657} \times 23,564 = 4,999 \text{ hab}$$

$$P_{2028-ZONA 2} = \frac{10,639}{18,657} \times 23,564 = 13,437 \text{ hab}$$

$$P_{2028-ZONA 3} = \frac{4,060}{18,657} \times 23,564 = 5,128 \text{ hab}$$

Comúnmente, en las áreas verdes, zonas industriales, espacios comerciales, sitios históricos, zoológicos, estaciones de trenes, zonas de crecimiento futuro de la ciudad, etc., se reflejará poca población en los Ageb; por consiguiente, es necesario identificarlas y destinarles atención especial en el momento de la planeación y diseño del sistema de agua potable, para asignar los caudales requeridos para estos usos de agua.

Cuando no se tenga información de Ageb, la información de la densidad de población en las zonas, colonias, fraccionamientos y desarrollos habitacionales de la ciudad se puede obtener a través de las conexiones domiciliarias reportadas por el organismo operador y aplicando el índice de hacinamiento (habitantes por vivienda); el resto del procedimiento será el mismo, solo que ahora en lugar de los límites de Ageb se utilizan límites de dichas colonias y fraccionamientos. Recientemente, INEGI ha iniciado la publicación de datos de población por lotificación en varias ciudades, por lo que se recomienda utilizarlos para la cuantificación espacial de la población.

2.5 LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA

La oferta hídrica es la cantidad de agua promedio anual disponible y aprovechable para abastecer a una determinada comunidad. Se compone del agua que se suministra al sistema de abastecimiento con las captaciones existentes (oferta hídrica aprovechada), más la que puede ser explotada por nueva infraestructura en la misma fuente o en alguna otra (oferta hídrica potencial).

La demanda de agua es la cantidad de agua promedio anual que requieren todos los habitantes de la comunidad, para su consumo doméstico, industrial, comercial y público, más el agua que se utiliza o desperdicia en el funcionamiento del sistema de abastecimiento de agua potable.

Es claro entonces que debe existir un equilibrio entre la demanda y el suministro de agua, para que un sistema de abastecimiento de agua potable cumpla su propósito y sea sostenible.

En este capítulo se presentan los conceptos que permiten establecer un análisis de las necesidades y oportunidades del uso del agua, y las estrategias para lograr un equilibrio entre la demanda y el suministro de agua.

2.5.1 Cuantificación del volumen de agua suministrada al sistema

El agua suministrada es aquella que es extraída de la fuente de abastecimiento (río, acuífero, lago, lluvia, mar, manantial) e inyectada al sistema de agua potable, mediante las obras de captación, como pozos, galería filtrante, obra de toma, etcétera.

Los equipos para la medición de caudal y volumen de agua potable suministrada se denominan “macromedidores”. Algunos de los aparatos prácticos, económicos y confiables disponibles en el mercado se muestran en la *Figura 2-30*.



a. Macromedidores comerciales fijos para registrar el agua suministrada al sistema de agua potable.

Fuente: Catálogos de fabricantes y distribuidores de medidores.



Medidores tipo ultrasónicos



Medidores electromagnéticos de inserción

b. Macromedidores comerciales portátiles para registrar el agua suministrada al sistema de agua potable.

Figura 2-30. Macromedidores comerciales fijos y portátiles para registrar el agua suministrada al sistema de agua potable.

Fuente: Catálogos de fabricantes y distribuidores de medidores.

La estadística básica que es necesaria disponer con relación a esta agua suministrada para la planeación de la sectorización de la red, consiste en anotar en una base de datos los valores mensuales de volumen o caudal registrados en cada captación. Se clasifica en:

a) Volúmenes de agua en captaciones con medidor. Es la cantidad de agua suministrada al sistema y registrada con un medidor fijo, de manera continua (*Figura 2-31*).



Figura 2-31. Captación con medidores fijos, funcionando continuamente.

Es necesario, al menos una vez cada año, realizar una campaña de medición de errores de exactitud en los medidores fijos de las captaciones, instalando en serie un medidor auditor certificado portátil (Figura 2-32).

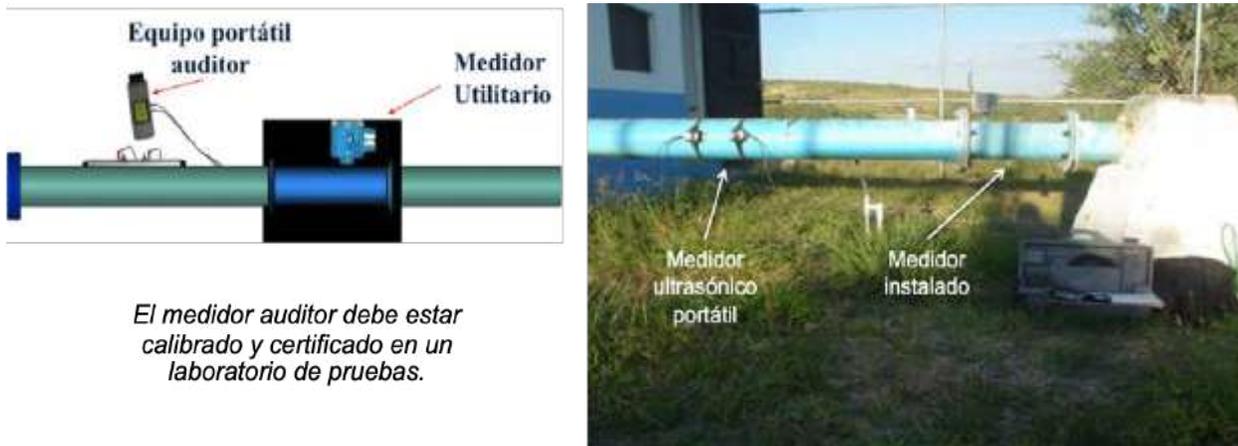


Figura 2-32. Instalación del medidor auditor portátil para prueba en campo de la exactitud de un macromedidor.

Fuente: Badger Meter de las Américas.

En el Cuadro 2-14 se muestran los datos que se recomiendan registrar en una prueba de campo sobre la exactitud de macromedidores.

Cuadro 2-14. Errores de exactitud en medidores fijos de captaciones de agua, derivados de pruebas de campo.

Concepto	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3
Tipo de Medidor y Número de serie	Annubar	Turbina	Ultrasónico
Tipo de registrador	Gráfico	Visual	Digital
Unidad de Medida	m ³	m ³	m ³
Fecha de Instalación	16-nov-94	10-feb-05	01-may-08
Diámetro del tubo	8 pulgadas	10 pulgadas	8 pulgadas
Última fecha de calibración	14-ene-96	24-ene-06	30-ene-10
Porcentaje de error promedio (%)	7.62	-5.66	3.09

El cálculo del error de exactitud se realiza con la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \text{Error de Exactitud} = \frac{(Q_{\text{medidor}} - Q_{\text{auditor}})}{Q_{\text{auditor}}} \times 100 \quad (2.20)$$

Donde:

Q_{medidor} = Gasto instantáneo registrado en el medidor fijo de la captación de agua, en L/s.

Q_{auditor} = Gasto instantáneo registrado en el medidor portátil o auditor, en L/s.

El signo “menos” del error significa que el medidor está submidiendo el caudal; el signo “más”, que está sobremidiendo. También, en la *ecuación 2.20* se utiliza el volumen acumulado, registrado en ambos medidores.

Entonces, los volúmenes de agua registrados en los medidores fijos se ajustan aplicándoles su error respectivo, mediante la ecuación siguiente:

$$V_{ajustado} = \frac{V_{RN-C}}{1 \pm \frac{\varepsilon}{100}} \quad (2.21)$$

Donde:

$V_{ajustado}$ = Volumen corregido de agua suministrada, en m^3 .

V_{RN-C} = Volumen registrado por el equipo fijo (no ajustado), en m^3 .

ε = Error de exactitud del medidor fijo, en porcentaje.

Ejemplo)

El volumen de 409,729 m^3 , registrado en un pozo en el mes de abril, debe ser ajustado a 434,311 m^3 , debido a que el medidor tiene un error de -5.66 % en el registro de agua, o sea:

$$V_{ajustado-abril-POZO\ 2} = \frac{V_{RN-C}}{1 \pm \frac{\varepsilon}{100}} = \frac{409,729m^3}{1 - \frac{5.66}{100}} = 434,311m^3$$

b) Volúmenes de agua en captaciones sin medidor fijo. Es la cantidad de agua suministrada al sistema y registrada temporalmente con un medidor portátil (*Figura 2-33*).



Figura 2-33. Registro de volumen de agua suministrada con medidor portátil.

El volumen de agua se obtiene con la medición de caudal en lapsos cortos; 15 minutos si el gasto es constante y siete días si es variable. El caudal promedio se anota con el número de horas de suministro de agua y se calcula entonces el volumen mensual utilizando la ecuación siguiente:

$$V_{S-SM} = 3.6 \times Q_m \times h_s \quad (2.22)$$

Donde:

V_{S-SM} = Volumen de agua suministrada sin medidor fijo, en m³.

Q_m = Caudal promedio, medido con equipo portátil en forma temporal; en L/s.

h_s = Número de horas de operación al mes.

Se reitera la importancia de registrar continuamente el valor del volumen de agua que se suministra al sistema de agua potable, medido con equipo fijo o portátil, para disponer de datos en las actividades de planeación, diseño, operación y mantenimiento de sectores de la red.

2.5.2 Volumen de consumos de usuarios del sistema de agua potable

El consumo es el volumen de agua potable que se entrega a los usuarios en su domicilio a través de la red de distribución del sistema, para el uso doméstico, comercial, industrial, hotelero y servicios públicos (riego de áreas públicas, escuelas, hospitales, combate de incendios, servicio de pipas). Según el tipo de usuario, el consumo se clasifica en consumo doméstico y no-doméstico (*Figura 2-34*).



Figura 2-34. Clasificación del consumo de agua potable.

La cuantificación del consumo de agua en el sistema de abastecimiento de agua se realiza con equipos de medición denominados “micromedidores”.

Existen en el mercado una multitud de micromedidores para el registro de volúmenes de agua consumida. Cuando se adquieren estos aparatos es necesario verificar que cumplan con especificaciones y que los fabricantes estén certificados. En la *Figura 2-35* se muestran algunos de los equipos ofrecidos por fabricantes; generalmente, los de tipo velocidad (chorro único o chorro múltiple) y volumétrico, se

instalan para medir el consumo a los usuarios domésticos y comerciales; para el grupo de grandes consumidores, industrias y hoteles se utilizan los medidores compuestos y de turbina.



a) Medidores para uso doméstico y usos públicos



b) Medidores para grandes consumidores, industrias y hoteles

Figura 2-35. Medidores fabricados para registro del volumen de consumo de agua potable fría.

Fuente: Catálogos de fabricantes y distribuidores de medidores.

Los micromedidores que se venden en México deben cumplir con las pruebas establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCFI-93 *Medición de flujo de agua en conductos cerrados de sistemas hidráulicos.- Medidores para agua potable fría*, en otros países aplica la ISO-4064; también la American Water Works Association (AWWA), publica estándares para pruebas en estos equipos.

Los micromedidores nuevos son susceptibles al daño, ya sea por defectos de fábrica o por traslados al sitio de instalación. Las pruebas de funcionamiento de los aparatos nuevos se desarrollan en bancos fijos de laboratorio y siguiendo las indicaciones de las normas oficiales nacionales o internacionales. Los bancos de prueba de medidores de agua deben estar certificados por una entidad oficial para garantizar la confiabilidad de los resultados (figura 2.36). Los medidores nuevos se prueban por lotes y muestreo; con el resultado se toman decisiones para aceptar o rechazar las ofertas de los proveedores de estos aparatos.

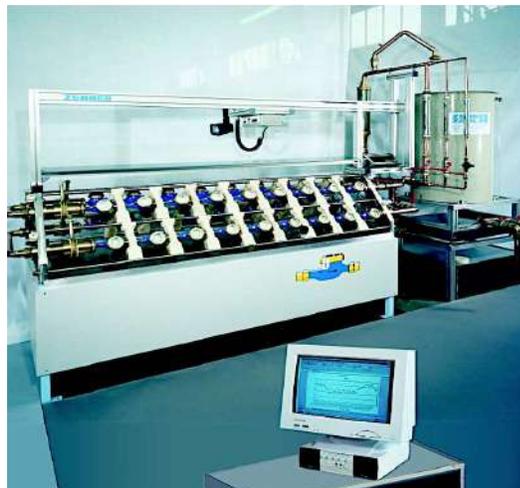


Figura 2-36. Banco de pruebas para medidores nuevos en laboratorio.

Fuente: http://en.zenner.com/shared/files/kataloge/spanisch/Pruefstaende_07_es.pdf

A pesar de la disposición en el mercado de los equipos de medición y reconociendo que es indispensable su instalación en la red de agua potable, existen muchas tomas domiciliarias que no cuentan con el micromedidor y, entonces, el consumo se contabiliza con el promedio de los consumos de usuarios similares que sí tienen medidor. A estos usuarios sin micromedidor se les denomina “usuarios de cuota fija”.

La estadística básica que se requiere disponer sobre el consumo de agua potable para la planeación de la sectorización de la red está conformada por valores mensuales del volumen de agua registrados o estimados por tipo de uso, conforme a la clasificación siguiente: a) volúmenes medidos de consumo de agua doméstica, b) volúmenes medidos de consumo de agua no-doméstica y c) volúmenes no-medidos de consumo de agua.

A continuación se describen las características principales de estas estadísticas de consumo de agua potable y se exponen los criterios básicos para asegurar la confiabilidad de los datos.

a) Volúmenes medidos de consumo de agua doméstica. Es la cantidad de agua utilizada en casas habitación para beber, higiene personal, lavado y riego de jardines domiciliarios, contabilizada con un medidor de manera continua (*Figura 2-37*); la estadística recomendada consiste en sumar todos los consumos de estos usuarios en forma mensual.



Figura 2-37. Registro de volúmenes medidos de consumo de agua doméstica.

b) Volúmenes medidos de agua no-doméstica. Es la cantidad de agua utilizada en comercios, industrias, hoteles y servicios públicos, contabilizada con un medidor de manera continua (*Figura 2-38*); la estadística se conforma con la suma mensual de los volúmenes de cada usuario.

Una vez que se instalan los micromedidores en las tomas domiciliarias del sistema de distribución de agua potable, se encuentran sujetos al desgaste y deterioro de sus elementos, principalmente por el funcionamiento constante y la acción química del agua (corrosión e incrustación). Esto conlleva a deficiencia en la lectura y una pérdida de exactitud del micromedidor.



Figura 2-38. Volúmenes medidos de consumo de agua No-doméstica.

Fuentes: <http://ts3.mm.bing.net/th?id=H.4744333439535294&pid=15.1&H=160&W=160>; <http://us.123rf.com/400wm/400/400/fouroaks/fouroaks0808/fouroaks080800047>; <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/tab/estudios/2010/27TA2010HD012.pdf>

Por lo tanto, es necesario realizar pruebas periódicas de exactitud a los micromedidores en sitio, utilizando una serie de dispositivos manuales portátiles previamente calibrados y cumpliendo las especificaciones de la norma (también se puede retirar el micromedidor y llevarlo a un banco de pruebas). Como hay demasiados micromedidores en un sistema de distribución de agua potable, no es posible inspeccionar y probar cada uno de ellos cada año, por lo que se recomienda realizar inspecciones anuales en todos los micromedidores con diámetros iguales y mayores a dos pulgadas y muestras aleatorias de los más pequeños.

El tamaño de la muestra n_{mic} se obtiene aplicando la ecuación 2.23.

$$n_{mic} = \frac{Z_c^2}{d_{mic}^2} P_{mic} (100 - P_{mic}) \quad (2.23) \text{ Donde:}$$

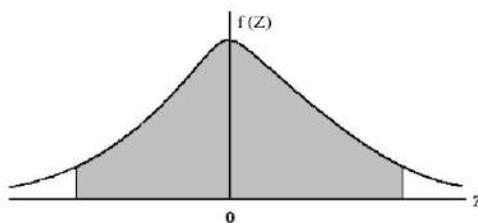
n_{mic} = Tamaño de la muestra (número de micromedidores que serán probados).

Z_c = Abscisa de la curva de probabilidad de distribución normal, para un nivel de confianza dado.

d_{mic} = Error deseado en la estimación (%).

P_{mic} = Porcentaje preestimado de micromedidores que tienen un error de exactitud fuera del límite máximo admisible del ± 2 %.

Los valores de Z_c se muestran en la Figura 2-39 (Ref. 2.3). Según la experiencia, el valor del 95% de nivel de confianza proporciona buenos resultados con tamaños de muestras económicas.



$Z_c = 1.00$ para el 68 % de confianza
 $Z_c = 1.29$ para el 90 % de confianza
 $Z_c = 1.96$ para el 95 % de confianza
 $Z_c = 3.09$ para el 99.9% de confianza

Figura 2-39. Curva de probabilidad normal tipificada y valores de Z_c .

El porcentaje preestimado de micromedidores P_{mic} se determina con base en resultados de pruebas de muestreo anteriores. Si no se tiene este tipo de información, se supone un porcentaje del 25% y conforme se avance en las pruebas de campo se ajusta el valor y con este se recalcula el tamaño de la muestra.

En la *Figura 2-40* se muestra el equipo utilizado en las pruebas de campo de la medición de los errores de exactitud a los micromedidores domiciliarios.



Figura 2-40. Equipo para la prueba en campo con objeto de obtener los errores de exactitud en medidores instalados en tomas domiciliarias de usuarios.

La prueba de exactitud de micromedidores se realiza con el procedimiento siguiente:

- Se desconecta el micromedidor de la toma domiciliaria en su extremo aguas abajo y se le inserta una manguera con llave para control de flujo; se debe purgar el aire dentro de la manguera.
- En seguida se toma la lectura del micromedidor, en litros y decilitros.
- Se abre totalmente la llave de la conexión de prueba y se llena un recipiente calibrado hasta la marca de los 20 litros, aproximadamente (Ver **Nota**).
- Se registra nuevamente la lectura del micromedidor.
- Se repite la prueba dos o tres veces.
- Se calcula el error de exactitud de cada prueba y se hace un promedio para obtener el error

del micromedidor.

Nota: Aunque la prueba de exactitud de cada micromedidor se debe hacer con varios caudales, cuando se utilizan los resultados para el cálculo pérdidas aparentes en el balance hídrico, esto es: gasto de arranque del aparato, 5% del gasto nominal, dos gastos intermedios menores al 100% del gasto nominal, 100% del gasto nominal; para efectos prácticos de corrección de volúmenes consumidos medidos, se recomienda realizarla solo para el caudal máximo que disponga la toma domiciliaria en cuestión.

El cálculo del error de exactitud del micromedidor en el registro de agua se realiza con la siguiente ecuación:

$$E_m = \left(\frac{V_{medidor} - V_{patron}}{V_{patron}} \right) \times 100 \quad (2.24)$$

Dónde:

E_m = Error de exactitud del micromedidor (%).

$V_{medidor}$ = Volumen registrado por el micromedidor (litros).

$V_{Patrón}$ = Volumen registrado en un recipiente calibrado (litros).

Si el error de exactitud del micromedidor resulta con signo “menos”, significa submedición del volumen de consumo; el signo “más” implica sobremedición.

Con los valores promedio de errores de exactitud de cada grupo de micromedidores, doméstico y no-doméstico, se ajustan los volúmenes registrados mensualmente, aplicando la ecuación siguiente:

$$V_{em} = \frac{V_{CRsc}}{1 \pm \frac{\epsilon m}{100}} \quad (2.25)$$

Donde:

V_{em} = Volumen de consumo ajustado por error de micromedición (m^3).

V_{CRsc} = Volumen de consumo sin ajuste, registrado por micromedidores (m^3).

ϵm = Error promedio de exactitud de micromedidores (+/- %).

Ejemplo)

En un sistema de agua potable se desea obtener el volumen medido de consumo anual doméstico. Para tal fin, se recolectaron en el organismo operador estadísticas de registros históricos de consumo y se obtuvo un valor total de 8,340,000 metros cúbicos. Paralelamente, se realizó un muestreo en campo de errores de exactitud a 560 micromedidores instalados en distintas tomas domiciliarias del sistema, el error promedio que se obtuvo fue igual a - 7.3 %. Se desea determinar el volumen de agua anual que en realidad consumieron todos estos usuarios domésticos.

Solución)

El consumo registrado de 8,340,000 m³ es un valor que tiene que ser ajustado por el error promedio de submedición de los micromedidores, por lo tanto se utiliza la ecuación 2.25 para obtener el consumo anual total real, esto es:

$$V_{em} = \frac{V_{CRsc}}{1 \pm \frac{\epsilon m}{100}} = \frac{8,340,000}{1 - \frac{7.3}{100}} = 8,996,764 \text{ m}^3$$

c) Volúmenes no medidos de consumo de agua (cuota fija). Es la cantidad de agua autorizada por el organismo operador del sistema a usuarios sin micromedidor (Figura 2-41). Esta agua se contabiliza con un valor promedio de consumo por toma domiciliaria, según el tipo de uso.



Figura 2-41. Toma domiciliaria sin micromedidor para registro del volumen de consumo (cuota fija).

Cuando no se contabiliza el agua con un micromedidor, la estimación del volumen de agua es complicada y pueden generarse errores grandes en su valor, especialmente en el agua para riego de áreas públicas e incendios. La forma práctica para reducir estos errores consiste en aplicar un consumo valorado unitario representativo del tipo de uso, calculado de las estadísticas de volúmenes de agua medidos; o bien, obtenerlo por muestreo, o también, de las especificaciones técnicas vigentes, como se verá más adelante en el inciso 2.5.3. Por lo tanto, es necesario recolectar los datos indicados en el Cuadro 2-15 y actualizarlos periódicamente, para poder aplicar dicho consumo valorado unitario representativo.

Cuadro 2-15. Información por coleccionar, para determinar los consumos valorados unitarios de usos de agua sin medidor.

Tipo de uso	Datos
Doméstico	-Número de tomas domiciliarias por clase socioeconómica. - Temperatura media anual del lugar en °C. - Número de habitantes con servicio de agua potable.
Comercial	- Número de comercios, oficinas, mercados y cines o teatros. - Área de comercios en m ² .
Industrial	- Número de industrias por tipo de producción.
Hoteles	- Número de cuartos hoteles de Gran Turismo, 4 y 5 estrellas, 3 estrellas; clasificados por zona turística y zona urbana.

Tipo de uso	Datos
Hospitales y clínicas	- Número de camas.
Escuelas	- Número de alumnos de educación básica y de educación media y superior.
Seguridad pública	-Número de internos en reclusorios y número de reclutas en cuarteles.
Estacionamientos y estaciones de transportes	- Número de pasajeros diarios y área en m ² .
Riego de áreas públicas	- Área de jardines, cementerios, campos deportivos en m ² .
Combate de incendios	- Número de siniestros ocurridos al año.

De esta manera, para conformar la estadística de consumo mensual de cuota fija por tipo de uso, se multiplica cada consumo valorado unitario y representativo de cierto tipo de uso, por el número de sus elementos existentes en el sistema de abastecimiento de agua potable, es decir:

$$Cm_{cuota\ fija, k} = \frac{Cu_k \times n_k \times 30días}{1,000Litros} \quad (2.26)$$

Donde:

$Cm_{Cuota\ Fija, k}$ = Consumo mensual de cuota fija (sin micromedidor) del tipo de uso de agua k, en m³.

Cu_k = Consumo valorado unitario representativo del uso de agua k, en L/"variable"/día.

n_k = Número de elementos de la "variable" del consumo de agua k.

"variable" = Representa una unidad de medida del elemento, es función del consumo de agua k, por ejemplo, para el uso doméstico será habitantes, para uso comercial de oficinas será m², para hospitales será cama, etc.

k = Tipo de consumo de agua: doméstico, comercial, industrial, etcétera.

2.5.3 Consumo unitario

El "consumo unitario" se define como el volumen de agua que utiliza un usuario del sistema de agua potable en un día típico promedio anual; sus unidades están dadas en litros por habitante y por día (L/hab/día). El consumo unitario se calcula de dos maneras: una, si existen estadísticas confiables de consumos y, otra, si no se tienen registros de medición domiciliaria confiable.

a) Cálculo del consumo unitario con estadísticas de medición confiables

Cuando existen estadísticas de volúmenes consumidos en un sistema de agua potable, debido a que una gran cantidad de tomas domiciliarias cuentan con micromedidor y registros de medición confiables,

el consumo unitario se calcula con la siguiente ecuación:

$$Cu_i = \frac{Vc_i}{N_{RMC}} \quad (2.27)$$

Donde:

Cu_i = Consumo unitario para el tipo de uso "i" (L/hab/día).

Vc_i = Volumen consumido para el tipo de uso "i" (L/día).

N_{RMC} = Número de habitantes servidos con micromedidor y medición confiable en la localidad.

i = Tipo de usos: Uso doméstico, no-doméstico o total.

Ejemplo)

En un sistema de agua potable de cierta localidad, se recolectaron las estadísticas anuales de consumos totales, registrados a los usuarios con medición domiciliaria confiable. El consumo total doméstico medido resultó de 4,322,000 metros cúbicos y el total no doméstico medido fue de 1,980,000 metros cúbicos. Determinar el consumo unitario para los usos doméstico, no-doméstico y total, si la población total es de 153,560 habitantes y la red de distribución tiene una cobertura de servicio a los usuarios del 95.7% del total de la población; el porcentaje de los usuarios con registros confiables de consumo resultó del 64.3% del total de la población servida.

Solución)

En primer lugar, se determina el número de habitantes servidos, N_s , multiplicando la población total por el porcentaje de cobertura, es decir:

$$N_s = 153,560 \times 0.957 = 146,957$$

Por lo tanto, el número de habitantes con registros confiables resulta igual a:

$$N_{RMC} = 146,957 \times 0.643 = 94,493$$

Luego, los consumos diarios doméstico, no doméstico y total son:

$$Vc_{doméstico} = \frac{4,322,000 \times 1000}{365} = 11,841,096 \text{ L / día}$$

$$Vc_{NO-doméstico} = \frac{1,980,000 \times 1000}{365} = 5,424,658 \text{ L / día}$$

$$Vc_{total} = 11,841,096 + 5,424,658 = 17,265,754 \text{ L / día}$$

Entonces, los consumos unitarios correspondientes son:

$$Cu_{doméstico} = \frac{Vc_{doméstico}}{N_{RMC}} = \frac{11,841,096}{94,493} = 125.3 \text{ L / hab / día}$$

$$Cu_{NO-doméstico} = \frac{V_{C_{NO-doméstico}}}{N_{RMC}} = \frac{5,424,658}{94,493} = 57.4 \text{ L / hab / día}$$

$$Cu_{total} = 125.3 + 57.4 = 182.7 \text{ L / hab / día}$$

Aunque es útil conocer el consumo unitario no-doméstico, basado en el número de habitantes de una localidad, es también útil y necesario establecer consumos unitarios no-domésticos en función de unidades relativas, sobre todo cuando se tienen zonas de la ciudad claramente identificadas con estas características y se desea calcular la distribución espacial del consumo. Así, el consumo comercial se calculará en litros por metro cuadrado de área y por día (L/m²/día); el consumo hotelero en litros por cuarto y por día (L/cuarto/día); el consumo en hospitales en litros por cama y por día (L/cama/día); el consumo industrial en metros cúbicos por día y por tipo de industria (m³/día/tipo); el consumo para riego de espacios públicos en litros por metro cuadrado de área verde y por día (L/m²/día); etcétera.

Ejemplo)

En una ciudad se registraron consumos mensuales de varios usos no-domésticos medidos, los cuales se presentan junto con los datos de sus principales características en el Cuadro 2-16. Se pretende realizar una ampliación de la red para abastecer de agua a un desarrollo que incluye diversos usos comerciales, turístico e industrial; sus datos particulares se muestran en el Cuadro 2-17. Calcular, entonces, los consumos unitarios no-domésticos y estimar el volumen de agua total anual que debe ser suministrado por la red para garantizar el consumo de agua.

Cuadro 2-16. Información estadística de consumos no domésticos con registros de medición del ejemplo.

Tipo de uso	Consumo (m³/mes)	Dato característico
<i>Oficinas y locales comerciales</i>	<i>1,950</i>	<i>Área = 3,000 m²</i>
<i>Hoteles</i>	<i>11,400</i>	<i>Número de cuartos de 5 estrellas = 250</i>
<i>Planta procesadora de bebidas</i>	<i>480</i>	<i>Una planta industrial</i>
<i>Riego de áreas públicas</i>	<i>1,760</i>	<i>Área de jardines = 10,300 m²</i>
<i>Combate de incendios</i>	<i>372</i>	<i>Número de siniestros = 5 por año Número de habitantes cubiertos = 4,650</i>

Cuadro 2-17. Información característica del desarrollo turístico que se conectará a la red de agua del ejemplo.

Tipo de desarrollo	Dato característico
<i>Oficinas y locales comerciales</i>	<i>Área = 8,700 m²</i>
<i>Hoteles</i>	<i>Número de cuartos de 5 estrellas = 75</i>
<i>Planta procesadora de bebidas</i>	<i>Una planta industrial</i>
<i>Riego de áreas públicas</i>	<i>Área de jardines = 14,900 m²</i>
<i>Combate de incendios</i>	<i>No. de siniestros esperados = 2 por año Número de habitantes cubiertos = 2,100</i>

Solución)

Los consumos unitarios de cada uso mostrado en el Cuadro 2-16 se determinan multiplicando el consumo mensual por 1,000 litros y dividiéndolo entre treinta días y entre su dato característico, resultando lo siguiente:

Cuadro 2-18. Cálculo de consumos unitarios de usos no domésticos del ejemplo.

Tipo de uso	Consumo (m³/mes)	Dato característico	Consumo unitario
Oficinas y locales comerciales	1,950	Área = 3,000 m ²	$\frac{1,950 \times 1,000}{30 \times 3,000} = 21.7 \text{ L/m}^2 / \text{día}$
Hoteles	11,400	Número de cuartos de 5 estrellas = 250	$\frac{11,400 \times 1,000}{30 \times 250} = 1,520 \text{ L/cuarto/día}$
Planta procesadora de bebidas	480	Una planta industrial	$\frac{480 \times 1,000}{30 \times 1} = 16,000 \text{ L/industria/día}$
Riego de áreas públicas	1,760	Área de jardines = 10,300 m ²	$\frac{1,760 \times 1,000}{30 \times 10,300} = 5.7 \text{ L/m}^2 / \text{día}$
Combate de incendios	3,720	Número de siniestros = 5 por año Número de habitantes cubiertos = 4,650	$\frac{3,720 \times 1,000}{30 \times 5 \times 4,650} = 5.3 \text{ L/hab/siniestro}$

Entonces, multiplicando los consumos unitarios calculados de los registros de medición, por el dato característico respectivo, se estima el volumen diario de agua que debe suministrar la red de agua potable al nuevo desarrollo comercial y turístico, resultando como sigue:

Cuadro 2-19. Volumen de agua a suministrar de la red para el nuevo desarrollo del ejemplo.

Tipo de desarrollo	Dato característico	Consumo unitario	Volumen de agua (L/día)
Oficinas y locales comerciales	Área = 8,700 m ²	21.7 L/m ² /día	188,790
Hoteles	Número de cuartos de 5 estrellas = 75	1,520 L/cuarto/día	114,000
Planta procesadora de bebidas	Una planta industrial	16,000 L/ind/día	16,000
Riego de áreas públicas	Área de jardines = 14,900 m ²	5.7 L/m ² /día	84,930
Combate de incendios	No. de siniestros esperados = 2 por año Número de habitantes cubiertos = 2,100	5.3 L/hab/siniestro	22,260
		Total	425,980

Finalmente, el volumen anual en metros cúbicos es igual al volumen diario por 365 días y entre 1,000 litros, es decir:

$$Vol_{Anual} = \frac{425,980 \times 365}{1,000} = 155,482.7 \text{ m}^3 / \text{año}$$

b) Cálculo de consumo unitario con ausencia de registros confiables de medición domiciliaria

Si se trata de sistemas de agua potable donde no se tiene ningún tipo de estadísticas de consumos, ya sea porque no existen micromedidores en las tomas domiciliarias, o bien, porque no son confiables los registros de medición, entonces para calcular el volumen de consumo de cuota fija se procede con alguna de las dos opciones siguientes: b.1) mediante un muestreo a usuarios conectados en el sistema de distribución, o b.2) con base en valores publicados en la bibliografía técnica y por instituciones oficiales.

b.1) Estimación de consumos unitarios con muestreo

Consiste en instalar micromedidores nuevos calibrados a un grupo de usuarios del sistema, realizar mediciones de consumo y extrapolar su valor al total de la población. El muestreo de consumos se realiza en campo, registrando directamente la lectura del micromedidor en un periodo definido. El muestreo debe ser aleatorio y representativo de un determinado tipo usuario; para el doméstico, conviene separar en clases socioeconómicas residencial, media y popular, con el criterio mostrado en el Cuadro 2-20.

Cuadro 2-20. Clasificación de clases socioeconómicas para estimación de consumo de agua. Fuente: Comisión Nacional del Agua (Ref. 2.1)

Clase socioeconómica	Descripción del tipo de vivienda
Residencial	Casas solas o departamentos de lujo que cuentan con dos o más baños, jardín de 50 m ² o más, cisterna y lavadora.
Media	Casas y departamentos que cuentan con uno o dos baños, jardín de 15 a 35 m ² y tinaco.
Popular	Vecindades y casas habitadas por varias familias que cuentan con jardín de 2 a 8 m ² y con un baño o compartiéndolo.

En el caso de usos no domésticos, la muestra puede ser clasificada por uso comercial, hotelero, hospitales, jardines públicos, escuelas y oficinas. Dada la peculiaridad de las industrias, no es aplicable el muestreo representativo a este tipo de usos, el registro de medición de consumo será válido solamente para la industria en la cual se realizó la prueba.

El total de usuarios de la muestra por cada tipo de usuario se calcula entonces con ecuación siguiente:

$$n_a = \left(\frac{Z_c^2}{d_c^2} \right) S_c^2 \quad (2.28)$$

Donde:

n_a = Tamaño de la muestra (número de usuarios que serán inspeccionados).

Z_c = Valor de la abscisa de la curva de probabilidad normal estandarizada, para nivel de confianza dado (Figura 2-39).

d_c = Error en la estimación del consumo unitario (m^3 /toma/mes).

S_c = Desviación estándar preestimada del consumo unitario esperado (m^3 /toma/mes).

La ecuación presupone que se conoce el valor del consumo unitario y su desviación estándar, lo cual es cierto si se tienen resultados de pruebas anteriores. Si no se cuenta con estos datos, entonces puede suponerse un valor a priori del consumo unitario basado en los cuadros del inciso b.2 y aplicarle una desviación estándar de la mitad. Conforme se avanza en las pruebas, se puede ir ajustando y recalculando el tamaño de la muestra. Se recomienda utilizar un error de estimación del orden del 5% sobre el promedio del consumo unitario por toma mensual. Según la teoría de probabilidad normal, la muestra no debe ser menor de treinta elementos.

Ejemplo)

En un organismo operador de agua potable se desea realizar un muestreo para precisar el consumo unitario medio del sistema de agua potable. Anteriormente, se han realizado pruebas y después de analizar los datos, se encontró que el valor medio de volumen mensual es de $28 m^3$ /mes, con una desviación estándar de $5.5 m^3$ /mes. Encontrar los tamaños de la muestra requerida para la estimación del consumo promedio, con errores de $\pm (0.5, 1 \text{ y } 1.5) m^3$ /mes, y niveles de confianza del 95%.

Solución)

Los tamaños de la muestra se calculan utilizando la ecuación 2.28, como sigue:

Para un error de $\pm 0.5 m^3$ /mes se tendrá:

$$n_a = \left(\frac{Z_c^2}{d_c^2} \right) S_c^2 = \frac{(1.96)^2}{(0.5)^2} \times (5.5)^2 = 465 \text{ usuarios}$$

Para un error de $\pm 1 m^3$ /mes resulta:

$$n_a = \left(\frac{Z_c^2}{d_c^2} \right) S_c^2 = \frac{(1.96)^2}{(1)^2} \times (5.5)^2 = 116 \text{ usuarios}$$

Por último, para el error de $\pm 1.5 m^3$ /mes se obtiene:

$$n_a = \left(\frac{Z_c^2}{d_c^2} \right) S_c^2 = \frac{(1.96)^2}{(1.5)^2} \times (5.5)^2 = 52 \text{ usuarios}$$

Ejemplo)

Durante una campaña de muestreo de consumos, en un grupo de usuarios de un sistema de agua potable se obtuvieron los resultados del Cuadro 2-21 (solo se presentan 13 usuarios del total de la muestra). A dichos usuarios se les instaló, previamente, un micromedidor nuevo y se les registraron los consumos en un período de treinta días (un mes). Calcular el consumo unitario de cada usuario, el consumo unitario medio de la muestra y estimar el consumo total anual del sistema de agua potable, si las fuentes oficiales indican que se abastecen a 67,200 habitantes; se ha determinado que el consumo anual de grandes consumidores es de 830,000 metros cúbicos.

Cuadro 2-21. Datos de la muestra de mediciones de consumo del ejemplo.

Número de usuario	Lectura en el micromedidor al iniciar el mes (m ³)	Lectura en el micromedidor al finalizar el mes (m ³)	Consumo total de cada usuario (m ³ /mes)	Número de habitantes
152	71256	71273	17	2
2511	25855	25903	48	5
3473	12113	12124	11	3
9502	321	339	18	3
6301	25110	25127	17	2
3274	39888	39914	26	4
15	78407	78432	25	4
2551	46691	46718	27	5
2981	34182	34208	26	3
379	85522	85562	40	4
4781	54540	54563	23	4
2834	33004	33021	17	4
6499	61789	61814	25	4
Total	---	---	320	47

Solución)

El consumo unitario se determina multiplicando el consumo mensual y dividiendo entre el número de habitantes y entre treinta días del mes, por ejemplo para el usuario Número 2,551 se tendrá:

$$Cu_{\text{Usuario-2551}} = \frac{27 \text{ m}^3 / \text{mes}}{5 \text{ habitantes} \times 30 \text{ días}} \times 1000 = 180 \text{ L / hab / día}$$

El resto de los resultados se presentan en el Cuadro 2-22, donde también se indica el consumo unitario medio.

Cuadro 2-22. Resultados del muestreo de consumos unitarios del ejemplo

Número de usuario	Consumo total de cada usuario (m ³ /mes)	Número de habitantes	Consumo unitario (l/hab/día)
152	17	2	283.33
2511	48	5	320.00
3473	11	3	122.22
9502	18	3	200.00
6301	17	2	283.33
3274	26	4	216.67
15	25	4	208.33
2551	27	5	180.00
2981	26	3	288.89
379	40	4	333.33
4781	23	4	191.67
2834	17	4	141.67
6499	25	4	208.33
		Promedio	228.91

Finalmente, el consumo total anual del sistema de agua potable será el siguiente:

$$V_{\text{Consumo-Anual}} = \frac{228.91 \times 67,200 \times 365}{1,000} + 830,000 = 6,444,704 \text{ m}^3$$

b.2) Estimación de consumo unitario con valores reportados en bibliografía técnica

Existe una gran cantidad de valores de consumos unitarios publicados en diversas especificaciones, normas, libros y tesis; su validez depende de la región, localidad y país. Por eso, es difícil generalizar los datos para cualquier sistema de abastecimiento de agua potable.

No obstante, cuando se trata de establecer estudios de planeación a gran visión, pre-factibilidad y factibilidad, o bien, para efectos comparativos o de directriz, los valores de consumos unitarios reportados resultan muy útiles. Para la planeación y diseño de la sectorización de la red, en ausencia de datos estadísticos o de muestreo, se recomienda utilizar los datos de dichos consumos unitarios, siempre que sean acreditados por las instituciones involucradas en el proyecto.

En el Cuadro 2-23 se muestran las especificaciones emitidas por la Conagua en México (Ref. 2.1), la cual especifica los consumos unitarios domésticos, clasificados por tipo de usuario (residencial, medio y popular) y en función de la temperatura media anual de la población (clima) indicada en el Cuadro 2-24.

Cuadro 2-23. Consumos unitarios para uso doméstico, especificados por la Conagua en México.

Clima	Consumo unitario por clase socioeconómica (L/hab/día)		
	Residencial	Medio	Popular
Cálido	400	230	185
Semi-cálido	300	205	130
Templado a frío	250	195	100

Cuadro 2-24. Clasificación del clima en función de la temperatura media, Conagua, México.

Temperatura media anual (°C)	Tipo de clima
Mayor que 22	Cálido
De 18 a 22	Semi-cálido
Menor que 18	Templado a frío

NOTA 1: Los consumos del Cuadro 2-23 fueron obtenidos de un estudio que realizó el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y la Conagua, en los años 1991 y 1992, en una muestra de 22 ciudades de la república mexicana. Los consumos se determinaron de forma directa, registrándolos diariamente, durante un mes, del micromedidor de 30 usuarios seleccionados en cada clase socioeconómica.

NOTA 2: Los consumos unitarios están publicados con otros valores en el manual del año 2015 de Conagua (Ref. 2.1.bis). Estos valores están tomados del resultado de un estudio estadístico elaborado en una muestra de 50 ciudades mexicanas. Los consumos se determinaron de manera indirecta, dividiendo el pago mensual (\$) de cada encuestado (usuario con medidor) entre la tarifa promedio de su recibo (\$/m³).

NOTA 3: Según las experiencias del autor en la elaboración de balances hídricos en varios sistemas de agua potable del país, muchos de los montos reportados en recibos mensuales son valores estimados por el área comercial del organismo operador. Esto sucede debido a que varios de los micromedidores instalados no funcionan, o bien, las lecturas mensuales no son correctas, entre otros. Por lo tanto, el autor del presente libro recomienda utilizar los consumos unitarios expuestos en el Cuadro 2-23, considerando que estos valores fueron obtenidos de mediciones directas a los usuarios, aceptando las limitaciones del tamaño de la muestra y con la observación de que estos datos serán utilizados como referencia, ya que siempre será mejor realizar un muestreo o estudio en cada localidad.

El cálculo del consumo unitario doméstico, aplicando la especificación de Conagua, se obtiene mediante un promedio ponderado en función de los porcentajes de clases socioeconómicas existentes en la localidad en estudio, es decir:

$$Cu_{doméstico} = \sum Z_i Cu_{clase, i} \quad (2.29)$$

Donde:

- $Cu_{doméstico}$ = Consumo unitario doméstico, en L/hab/día.
- Z_i = Porcentaje de clase socioeconómica i, en %.
- $Cu_{Clase, i}$ = Consumo unitario de la clase socioeconómica i.
- i = Clase socioeconómica.

Ejemplo)

Determinar el consumo unitario doméstico para las dos ciudades “A” y “B”, con población y clima igual, y con los porcentajes de clases socioeconómicas mostradas en la Figura 2-42.

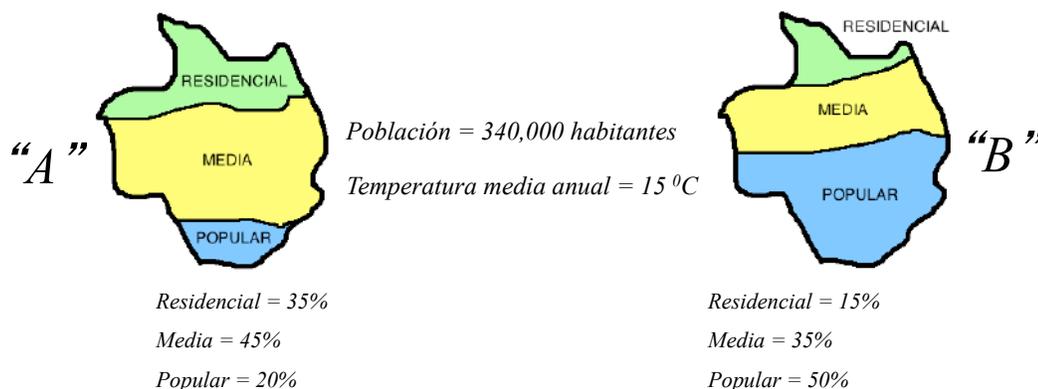


Figura 2-42. Porcentajes de clase socioeconómica del ejemplo.

Solución)

Del Cuadro 2-24 se deduce que el clima de las poblaciones para una temperatura de 15°C es del tipo templado o frío. Entonces, del Cuadro 2-23 se obtienen los siguientes consumos unitarios de las clases residencial, media y popular:

Residencial = 250 L/hab/día; Medio = 195 L/hab/día; Popular = 100 L/hab/día

Ahora, aplicando la ecuación 2.29, se obtiene el consumo unitario doméstico de cada ciudad, como sigue:

Población A:

$$Cu_{doméstico-A} = 0.35 \times 250 + 0.45 \times 195 + 0.2 \times 100 = 195.25 \text{ L / hab / día}$$

Población B:

$$Cu_{doméstico-B} = 0.15 \times 250 + 0.35 \times 195 + 0.5 \times 100 = 155.75 \text{ L / hab / día}$$

Nótese que aunque el número de habitantes y la temperatura son iguales en ambas poblaciones, el consumo unitario doméstico es distinto debido a la concentración de las diferentes clases socioeconómicas de cada una de ellas.

En el Cuadro 2-25 se presentan algunos consumos unitarios no domésticos, publicados en las especificaciones de diseño mexicanas por la Conagua (Ref. 2.1), que se consideran de utilidad en la planeación y diseño de sistemas de abastecimiento de agua potable.

Cuadro 2-25. Consumos unitarios no domésticos, publicados en México, para la planeación y diseño de sistemas de agua potable.

Tipo de uso	Tipo de instalación	Consumo unitario
Comercial	Oficinas (cualquier tipo)	20 L/m ² /día
	Locales comerciales	6 L/m ² /día
	Mercados	100 L/local/día
Industrial	Lavanderías	40 L/kilo ropa seca
	Lavado de automóviles	60 L/automóvil
	Azucarera	4.5 – 6.5 m ³ /día
	Química	5 – 25 m ³ /día
	Papel y celulosa	40 - 70 m ³ /día
	Bebidas	6 - 17 m ³ / día
	Textil	62 – 97 m ³ / día
	Siderúrgica	5 - 9 m ³ / día
Hoteles	Alimentos	4 - 5 m ³ / día
	Gran turismo zona turística	2,000 L/cuarto/día
	Gran turismo zona urbana	1,000 L/cuarto/día
	4 y 5 estrellas zona turística	1,500 L/cuarto/día
	4 y 5 estrellas zona urbana	750 L/cuarto /día
	1 a 3 estrellas zona turística	1,000 L/cuarto/día
Salud	1 a 3 estrellas zona urbana	400 L/cuarto/día
	Hospitales, clínicas y centros de salud	800 L/cama/día
Escuelas	Orfanatorios y asilos	300 L/huésped/día
	Educación básica	20 L/alumno/turno
	Educación media y superior	25 L/alumno/turno
Seguridad pública	Reclusorios	150 L/interno/día
	Cuarteles	150 L/persona/día
Transporte	Estaciones de transporte	10 L/pasajero/día
	Estacionamientos	2 L/m ² /día

Tipo de uso	Tipo de instalación	Consumo unitario
Riego de áreas públicas	Jardines, cementerios, campos deportivos	5 L/ m ² /día
Combate de incendios	Estaciones de bomberos	4 L/siniestro/habitante/año

Nota: Las necesidades de riego y generadas por empleados se consideran por separado a razón de 5 L/m²/día para riego y 100 L/empleado/día para trabajadores.

2.5.4 Pérdidas de agua

En un concepto básico, la cantidad de agua que se entrega a los usuarios para su consumo debiera ser igual al volumen de agua que se extrae en las fuentes de abastecimiento y se suministra al sistema de agua potable. Sin embargo, en la práctica esto no sucede así debido, por un lado, a que las tuberías y elementos del sistema envejecen, se desgastan y fallan continuamente, provocando que el agua escape y se pierda en fugas; y por otro, a que ocurren errores de medición, se conectan usuarios ilegalmente y se cometen errores en la lectura y procesamiento de registros de campo. Por lo tanto, siempre resultará menor el volumen agua entregada a los usuarios para su consumo, que el extraído y suministrado al sistema de abastecimiento.

El término “pérdidas de agua” se define como la suma del valor del volumen de fugas, más el volumen de agua resultante de los errores de medición, facturación y usos ilegales de agua. En este contexto, las pérdidas de agua se dividen en dos componentes: a) pérdida real y b) pérdida aparente, como se aprecia en la *Figura 2-43*.



Figura 2-43. Clasificación de las pérdidas de agua potable.

Es decir, se trata, por un lado, del agua que se desperdicia (fugas) y no está disponible para los clientes del sistema de abastecimiento; y por otro lado, del agua por la que no se recibe ningún pago

compensatorio del cliente que aprovecha el agua (fallas en la medición y facturación) o se mide mal en las captaciones (errores de medición).

Del informe anual de *benchmarking* desarrollado por la Asociación de Entes Reguladores de Agua Potable y Saneamiento de las Américas (ADERASA) para el año 2007, en el que participaron 96 empresas de 14 diferentes países, uno de los indicadores considerados es el de pérdidas en la red, el cual se define como la cantidad de agua comercializada que llega a destino respecto al total del agua suministrada, expresado este indicador en porcentaje. Se encontró que el valor promedio de las pérdidas es de 47%, con variaciones entre 7 y 85% por ciento (Figura 2-44).

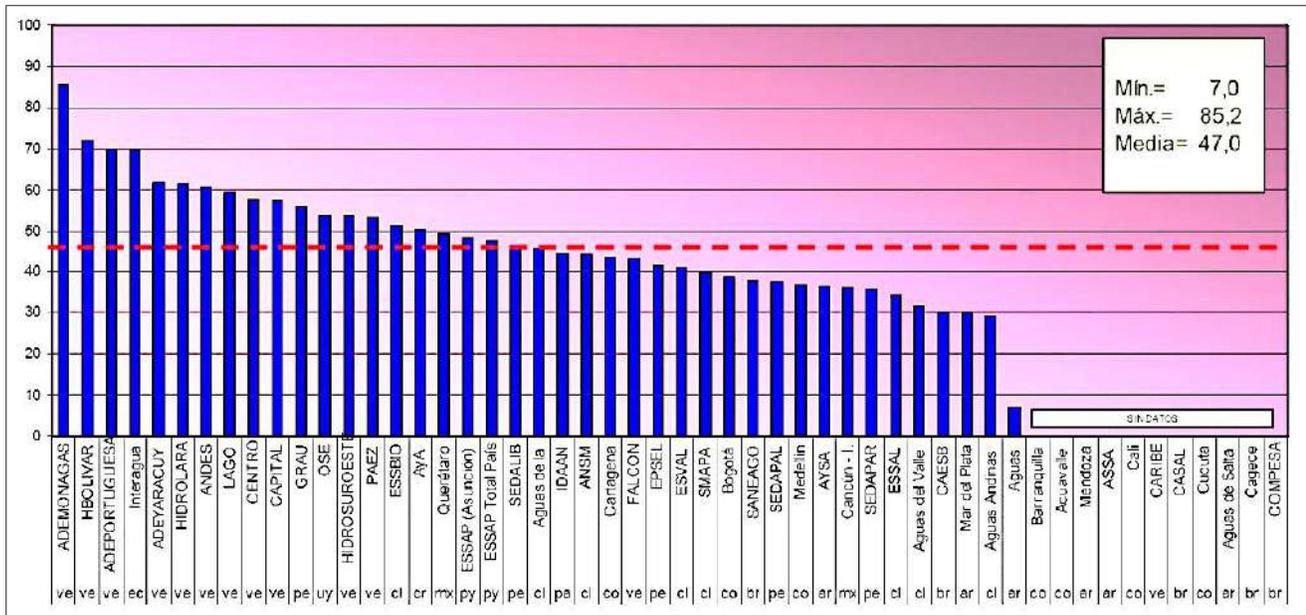


Figura 2-44. Situación de las pérdidas en la región.

Fuente: ADERASA, 2009.

Por otra parte, la base de datos de indicadores de desempeño de las empresas de agua del mundo contenidas en la iniciativa del Banco Mundial, conocida como IBNET (Red Internacional de Comparación de Empresas de Agua y Saneamiento, con información de más de novecientas empresas en 44 países en desarrollo), indica que el valor promedio de las pérdidas es de 35%.

Estos porcentajes son alarmantes si se extrapolan a la práctica; por ejemplo, en una zona habitacional, que cuenta con un sistema de abastecimiento, con un gasto promedio suministrado de 500 L/s, si se tiene el nivel de pérdidas totales del 35%, entonces se perdería el siguiente volumen de agua:

$$\text{Pérdidas de agua} = 500 \text{ L/s} \times 0.35 = (43,200 \text{ m}^3/\text{día}) \times (0.35) = 15,120 \text{ m}^3/\text{día} = 5'518,800 \text{ m}^3/\text{año}.$$

Y si el costo de producción es de 0.30 USD/m³, el correspondiente costo del agua perdida sería:

$$\text{Costo del agua perdida} = (5'518,800 \text{ m}^3/\text{año}) \times (0.3 \text{ USD}/\text{m}^3) = 1'655,640 \text{ USD}/\text{año}.$$

Las pérdidas de agua en los sistemas de abastecimiento de agua potable tienen implicaciones sanitarias y económicas que impactan directamente en costos excesivos de producción, distribución, comercialización y desarrollo institucional.

Específicamente, el problema de las fugas se refleja en un deterioro de la red de distribución, pérdida del agua producida que no llega a los consumidores y una disminución de la capacidad hidráulica del sistema. Por lo general, nadie utiliza el agua de las fugas, lo que significa una pérdida de dinero para el organismo operador y escasez para los pobladores de la localidad. Por una sola fuga llegan a fluir caudales que van desde los 20 mL/s (51.8 m³/mes) en tomas domiciliarias, y más de 250 mL/s (648 m³/mes) en tuberías principales y cajas de válvulas.

De acuerdo con resultados de la Conagua, en México la frecuencia de ocurrencia de fugas en tomas domiciliarias es del orden del 90%, mientras que en tuberías de la red es del 10% en promedio. También, se ha determinado que en las redes de los sistemas de agua potable mexicanos se pierde del orden del 35% del caudal producido en las captaciones.

Por su parte, el problema de las pérdidas de agua aparentes, causadas por las deficiencias en la facturación, provoca un resquebrajamiento económico para la empresa operadora. El hecho de que no se registre el volumen de agua consumida por los usuarios en los micromedidores descalibrados o descompuestos, o la lectura en los aparatos no se realice correctamente, o se cometan errores en la contabilización de agua, o se conecten usuarios ilegales a la red, trae como consecuencia un deterioro importante en su sistema comercial y financiero.

La experiencia internacional y nacional indica que es posible reducir el nivel de fugas a un mínimo aceptable entre el 20% y 15% del volumen suministrado al sistema, pero para lograrlo se deben realizar actividades permanentes de localización y reparación, implementando un proceso sistemático e integral que incluya su diagnóstico, generación de estadísticas, detección instrumentada, control de presión en la red, rehabilitación de elementos del sistema, acciones de mejoramiento de la calidad de las reparaciones y evaluación económica.

En cambio, el nivel de pérdidas aparentes se puede llevar a un nivel cercano al 5%, pero habrá que invertir recursos para depurar y actualizar el padrón de usuarios, adquirir medidores de calidad, implementar sistemas de lectura remota, programar acciones para regularizar los usos ilegales y efectuar acciones correctivas como corte o restricción del servicio de abasto a quien reincida en este tipo de problema.

Obviamente, la implementación de todas estas acciones para reducir las pérdidas conlleva a una inversión por parte del organismo operador. Diversas experiencias, tanto en municipios pequeños como grandes, nacionales o extranjeros, demuestran que, aunque no es una regla general, siempre será más rentable para el organismo operador reparar las fugas que invertir en nueva infraestructura. Adicionalmente, se ha comprobado que suele ser mucho más rentable y sencillo atacar y mejorar las ineficiencias por las pérdidas aparentes, que las pérdidas reales (fugas). El mayor beneficio directo al reducir las fugas es el ahorro en costos de producción y distribución de agua, principalmente de energía eléctrica y potabilización. El beneficio de la reducción de pérdidas aparentes resulta en un mayor ingreso de dinero por la venta efectiva de agua.

El estado actual de las pérdidas de agua de un sistema de abastecimiento de agua potable se determina al aplicar un “balance hídrico”. El balance hídrico, también denominado auditoría del agua, es una técnica estadística para verificar detalladamente la forma de administrar el suministro y el consumo de agua de un sistema de agua potable, y discriminar el volumen de agua que se desperdicia en fugas (pérdidas reales) del que se pierde en consumos incontrolados (pérdidas aparentes), tal como se muestra en la *Figura 2-45*.

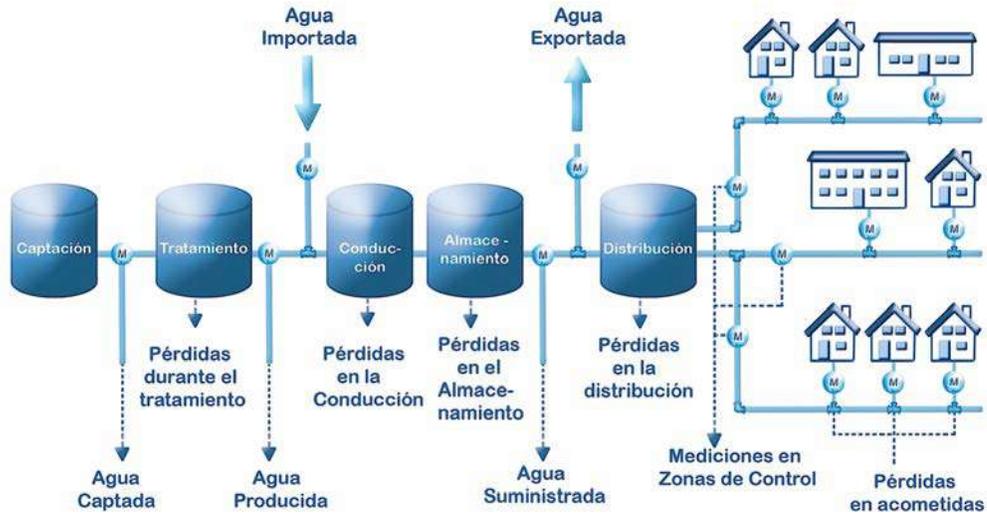


Figura 2-45. Esquema de administración del agua de un sistema de abastecimiento de agua potable.

El balance hídrico ha sido establecido por la *American Water Works Association* (AWWA) y la *International Water Association* (IWA), como se muestra en la *Figura 2-46.a*. La técnica ya está adaptada a las condiciones de los sistemas de agua potable mexicanos y latinoamericanos, y se aplica generalmente en períodos de estudio anuales según el esquema de la *Figura 2-46.b*.

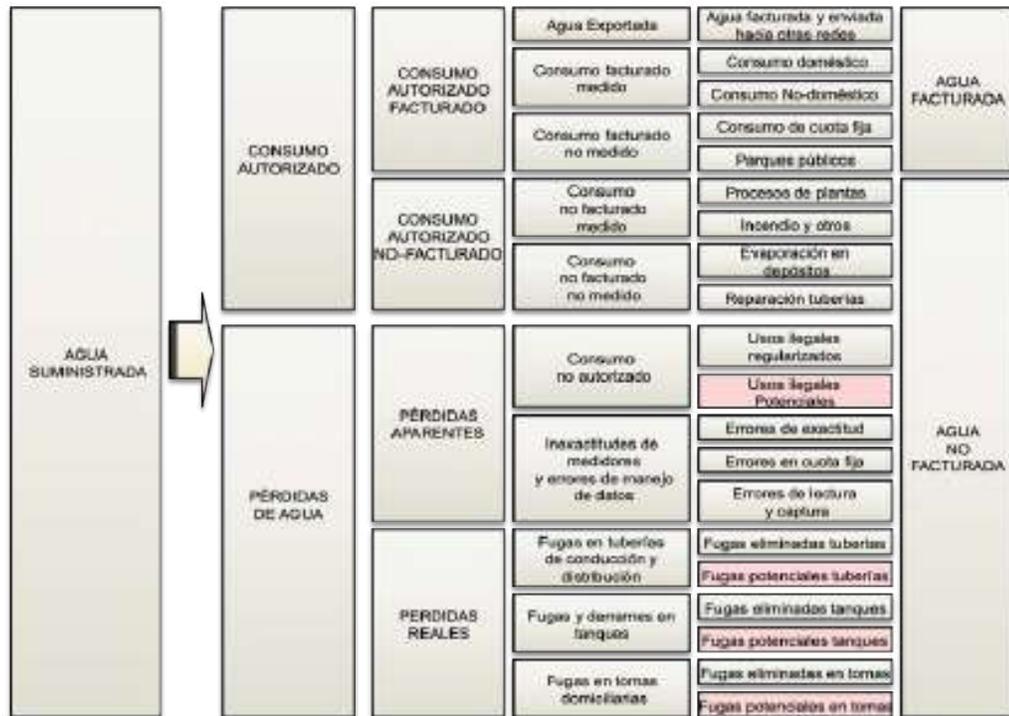


BALANCE HÍDRICO IWA-AWWA



Agua Suministrada al Sistema	Consumo Autorizado	Consumo Autorizado Facturado	Agua Facturada Exportada	Agua Facturada	
			Consumo Facturado Medido		
			Consumo Facturado No Medido		
	Pérdidas de Agua	Pérdidas Aparentes	Consumo Autorizado No Facturado	Consumo No Facturado Medido	Agua No Facturada
				Consumo No Facturado No Medido	
		Pérdidas Reales	Pérdidas Reales	Inexactitudes de los Medidores y errores de manejo de datos	
				Consumo No Autorizado	
				Fugas de las Tuberías de Conducción y Distribución	
		Fugas y Derrames en Tanques de Almacenamiento			
		Fugas en Tomas Domiciliarias			

a. Balance hídrico o auditoría de agua, presentada por la AWWA - IWA.



b. Esquema del balance hídrico, basado en la técnica de la AWWA - IWA.

Figura 2-46. Balance hídrico o auditoría de agua, presentada por la AWWA – IWA y esquema del balance hídrico, basado en la técnica de la AWWA - IWA.

La aplicación de este esquema de balance hídrico consiste en estimar cada uno de los volúmenes indicados en cada bloque, utilizando datos estadísticos e información de mediciones y muestreos de campo. Los bloques señalados como “potenciales” representan el volumen de agua que no puede ser identificado y que permanecerá en la red como fugas y usos ilegales, hasta que se implementen acciones para su localización y reducción. Así, al comparar la suma de este volumen potencial de agua, con respecto a la cantidad de agua suministrada en un período, se obtiene el porcentaje de pérdidas potenciales de agua en el sistema de abastecimiento.

El volumen de las pérdidas potenciales totales en un cierto período de estudio se calcula con la siguiente expresión.

$$V_{PP} = V_{SV} - V_{CAF} - V_{CANF} - V_{PAI} - V_{PRI} \quad (2.30)$$

Donde:

V_{PP} = Volumen estimado de pérdidas potenciales totales (fugas y usos ilegales), en m^3 .

V_{SV} = Volumen de suministro total de agua, en m^3 .

V_{CAF} = Volumen de consumo autorizado facturado, en m^3 .

V_{CANF} = Volumen de consumo autorizado no-facturado, en m^3 .

V_{PAI} = Volumen de pérdidas aparentes identificadas (usos ilegales regularizados, errores de exactitud, cuota fija y lectura), en m^3 .

V_{PRI} = Volumen de pérdidas reales eliminadas (fugas en tuberías, tanques y tomas domiciliarias), en m^3 .

El cálculo de cada uno de los términos de la *ecuación 2.30* se deduce de un análisis estadístico de los datos disponibles y generados con mediciones o de muestreo. Mientras más ciertos sean los datos, mayor será la confiabilidad del valor obtenido sobre la pérdida potencial de agua en el sistema. En el *Cuadro 2-26* se muestran los factores que afectan la certidumbre de cada uno de los datos que intervienen en la aplicación del balance hídrico y los ajustes que deben realizarse para aumentarla. Algunos de estos ajustes implican trabajo de campo, costo y tiempo adicional; si no se dispone de ello, entonces se omiten, pero debe señalarse el grado de incertidumbre que generarán en los resultados finales de las pérdidas potenciales.

Cuadro 2-26. Factores que afectan la exactitud de datos y ajustes en el balance hídrico.

Concepto	Tipo	Factor de incertidumbre	Ajuste para mejorar certeza del dato
Agua Suministrada.	Agua abastecida al sistema desde las captaciones.	Inexactitud de medidores.	Realizar pruebas de exactitud in situ a todos los macromedidores.
		Ausencia de medidores o registros.	Realizar mediciones puntuales de caudal con equipo portátil y extrapolar valores con el tiempo de operación.
		Reserva de agua almacenada en tanques.	Registrar volumen en tanques al inicio del período del estudio y restar el volumen final.
Consumo autorizado facturado.	Agua facturada y enviada hacia otras redes.	Inexactitud de medidores.	Realizar pruebas de exactitud in situ a todos los medidores funcionando.
		Ausencia de medidores o registros.	Realizar mediciones puntuales de caudal con equipo portátil y extrapolar valores con el tiempo de suministro.
	Consumo doméstico y No doméstico.	Ausencia de estadísticas y datos.	Depurar y ordenar los datos de consumos de usuarios en la facturación mensual.
	Consumo de cuota fija.	Ausencia de medidores o datos estadísticos o valores de muestreos de campo.	Utilizar consumos unitarios de agua derivados de datos estadísticos de usuarios medidos.
Riego de parques públicos.	Utilizar consumos unitarios de agua obtenidos de muestreos de campo.		
Consumo autorizado No facturado.	Agua para procesos de plantas potabilizadoras y de tratamiento.		Utilizar consumos unitarios de agua definidos en bibliografía técnica.
	Agua para combatir incendios.		
	Agua evaporada en depósitos abiertos.		
	Agua desperdiciada en la reparación de tuberías.		

Concepto	Tipo	Factor de incertidumbre	Ajuste para mejorar certeza del dato
Pérdidas aparentes.	Agua de uso ilegal regularizado.	Ausencia o escasez de estadísticas.	Analizar altas en el padrón de usuarios, causas y fechas; y valorar con consumos unitarios de agua.
	Agua por error de exactitud en micromedidores domiciliarios.	Ausencia o escasez de pruebas de exactitud.	Realizar pruebas de exactitud in situ a muestras de micromedidores y extrapolar valores a todos los usuarios.
	Agua por error en estimación de cuota fija.	Incorrecta asignación de consumo unitario.	Comparar consumos unitarios asignados contra los consumos unitarios valorados con pruebas de campo a usuarios.
	Agua por error de lectura y captura de consumo a usuarios.	Ausencia o escasez de estudios.	Realizar un estudio de facturación por muestreo y comparar con las facturas del organismo operador.
Pérdidas reales.	Agua de fugas eliminadas en tuberías.	Ausencia o escasez de estadísticas y registros.	Realizar muestreos de aforos de fugas existentes en tuberías y cajas de válvulas, y valorar con la estadística de reparaciones históricas
	Agua de fugas eliminadas en tanques y depósitos.		Realizar una valoración con reportes históricos de reparaciones.
	Agua de fugas eliminadas en tomas domiciliarias.		Realizar muestreos de aforos de fugas existentes en tomas seleccionadas aleatoriamente y valorar con la estadística de reparaciones históricas.

Ejemplo)

En un organismo operador se regularizaron 27 usos ilegales en el mes de julio y se repararon 440 fugas en tomas domiciliarias con un tiempo promedio de permanencia de 7 días. Debido a la ausencia de estadísticas de caudales de fugas y de consumos de los usuarios ilegales, se realizó un muestreo de campo y resultó, por un lado, que las fugas en tomas tienen un caudal medio de 35 mL/s y, por otro, que el consumo promedio de un grupo de usuarios medidos es de 19 m³/mes. Se observa que los consumos de los usuarios ilegales antes de su regularización eran de 6 m³/mes. Determinar el volumen de agua que no registró el organismo operador de enero a junio, por el consumo de los usuarios ilegales, y calcular el volumen de agua por las fugas reparadas.

Solución)

El volumen de agua que no se reportó de enero a junio, por el consumo de los usuarios ilegales, o volumen de agua identificada por usos ilegales regularizados, se calcula de la forma siguiente:

$$V_{NRUi} = N_{Ui}(C_P - C_{Ui})T_{Ui} \quad (2.31)$$

Donde:

V_{NRUi} = Volumen de agua no reportada por el consumo de usos ilegales, en m³.

N_{Ui} = Número de usuarios ilegales regularizados.

C_P = Consumo promedio de usuarios medidos, en m^3/mes .

C_{Ui} = Consumo de usuarios ilegales antes de su regularización, en m^3/mes .

T_{Ui} = Tiempo de permanencia de los usos ilegales, en meses.

Sustituyendo valores en la ecuación 2.31 se obtiene el consumo no reportado por usos ilegales de enero a junio, esto es:

$$V_{NRUi} = N_{Ui}(C_P - C_{Ui})T_{Ui} = 27 \times (19 - 6) \times 6 = 2,106 m^3$$

En relación con el volumen de fugas reparadas, el valor se determina con la expresión:

$$V_{fugas\ reparadas} = N_f \times q_f \times T_f \times \frac{86,400\ s / día}{1,000,000\ mL / m^3} \quad (2.32)$$

Donde:

N_f = número de fugas.

q_f = Caudal de fugas, en mL/s .

T_f = Tiempo de permanencia de las fugas, en días.

Sustituyendo valores se obtiene:

$$V_{fugas\ reparadas} = N_f \times q_f \times T_f \times \frac{86,400\ s / día}{1,000,000\ mL / m^3} = 440 \times 35 \times 7 \times 0.0864 = 9,314 m^3$$

En el Cuadro 2-27 se muestra un ejemplo típico de las estadísticas anuales recolectadas en un organismo operador, aplicadas a una auditoría de agua o balance hídrico, para la estimación del volumen de pérdidas potenciales en el sistema de abastecimiento de agua potable.

Cuadro 2-27. Ejemplo de la aplicación de un balance de agua potable (período anual).

Línea	Concepto	Cantidad m^3
Agua suministrada		
1	Suministro total de agua sin ajustar.	14,755,886
2A	Error en exactitud de medidores de la fuente de abastecimiento (+ó-).	-118,413
2B	Cambio en reservas y tanques de almacenamiento (+ó-).	-60,120
2C	Otras contribuciones o pérdidas (+ó-).	-47,581
3	Total de ajustes en el suministro total de agua (sumar líneas 2A, 2B y 2C).	-226,114
4	Suministro total de agua corregido (sumar líneas 1 y 3).	14,529,773
Consumo autorizado facturado		
5	Agua exportada hacia otras redes.	0
6	Consumo facturado medido (sumar líneas 6A y 6B).	5,852,455
6-A	Consumo Doméstico.	5,119,689
6-B	Consumo No-Doméstico.	732,766
7	Consumo facturado No-Medido (sumar líneas 7A y 7B).	1,913,116
7-A	Consumo de cuota fija.	1,749,888
7-B	Parques públicos y áreas verdes.	163,228
8	Consumo total de agua autorizado facturado (Sumar Líneas 5, 6 y 7).	7,765,571

Línea	Concepto	Cantidad
		m ³
Consumo autorizado no facturado		
9	Consumo No-Facturado Medido (sumar líneas 9A y 9B).	142,804
9-A	Proceso de plantas de tratamiento y potabilizadoras.	47,304
9-B	Agua para incendio.	95,500
10	Consumo No-Facturado No-Medido (sumar líneas 10A, 10B y 10C).	41,958
10-A	Evaporación en depósitos.	480
10-B	Reparación de tuberías.	41,478
10-C	Otros servicios (Pipas, hospitales y Mercados).	0
11	Consumo total de agua autorizado no-facturado (Sumar líneas 9 y 10).	184,762
Pérdidas aparentes identificadas		
12	Consumo No-Autorizado (igual a línea 12A).	13,708
12-A	Usos ilegales regularizados.	13,708
13	Inexactitudes de medidores y errores de manejo de datos (sumar líneas 13A a 13E).	490,375
13-A	Error de exactitud en medidores domésticos (+ó-).	183,187
13-B	Error de exactitud en medidores No-domésticos (+ó-).	31,318
13-C	Error de desfase de lecturas de medición en el período (+ó-).	3,115
13-D	Errores en cuota fija (+ó-).	272,756
13-E	Errores descubiertos en el proceso contable.	0
14	Pérdidas aparentes totales identificadas (Sumar Líneas 12 y 13).	504,083
Pérdidas reales eliminadas		
15	Fugas eliminadas en tuberías.	10,587
16	Fugas eliminadas en tanques.	1,296
17	Fugas eliminadas en tomas domiciliarias.	17,588
18	Pérdidas reales totales identificadas (Sumar Líneas 15, 16 y 17).	29,471
Pérdidas potenciales totales		
19	Pérdidas potenciales de agua potable (restar líneas 8, 11, 14 y 18 de 4).	6,045,886
	Porcentaje de pérdida potencial de agua (dividir línea 19 entre línea 4, multiplicar por 100).	41.61 %

Las pérdidas potenciales se discriminan en fugas y usos ilegales, a través de estudios estadísticos y muestreos de campo. Existe una metodología para discriminar estas pérdidas potenciales de agua, publicada en el año de 1996 (*Ref. 2.4*), que permite estimar con suficiente aproximación y confiabilidad la cantidad de agua perdida debida a fugas en conexiones domiciliarias, tuberías principales y secundarias, cajas de válvulas y la pérdida aparente por usos no autorizados. Para obtener el volumen total estimado de pérdidas reales potenciales a través de esta metodología, se realiza una evaluación estadística de los volúmenes del sistema de agua potable, la cual consta de las actividades señaladas en el *Cuadro 2-28*.

Cuadro 2-28. Método estadístico para discriminar fugas potenciales propuesto en 1996 (Ref.2.4).

Evaluación del volumen de fugas potenciales en conexiones domiciliarias (V_{FPT}).	Se realizan mediante muestreo estadístico de fugas en campo.
Evaluación del volumen de fugas potenciales en cajas de válvulas, (V_{FPV}).	
Evaluación del volumen de fugas potenciales en depósitos y tanques, (V_{FPD}).	Se determinan con inspección física de las estructuras y aforo directo de las fugas.

Evaluación del volumen de pérdidas aparentes potenciales (m^3), (V_{PAP}).	Se obtiene a través de muestreo estadístico de campo de usos ilegales.
Cálculo del volumen de fugas potenciales en tuberías de la red de distribución (V_{FPR}).	<p>Se calcula utilizando la siguiente expresión:</p> $V_{FPR} = V_{PP} - V_{PAP} - V_{FPT} - V_{FPV} - V_{FPD} \quad (2.33)$ <p>Donde:</p> <p>V_{PP} = Volumen estimado de fugas potenciales totales (m^3), se obtiene del balance hídrico o auditoría de agua.</p>

No obstante, para efectos de planeación y diseño de las capacidades hidráulicas de la infraestructura del sistema de agua potable, en un proyecto de sectorización interesa discriminar solamente el volumen de fugas totales potenciales, del volumen de pérdidas potenciales por usos ilegales; ya que en el dimensionamiento hidráulico de las obras que integran el abastecimiento de agua potable con sectores, se requiere adicionar al caudal de diseño el agua que se desperdicia por fugas. En cambio, cuando se van a implementar acciones específicas para optimizar un programa de reducción y control de fugas permanente, entonces sí es necesario llevar a cabo la discriminación de los volúmenes de fugas en todos sus componentes.

Por lo tanto, para la planeación y diseño de un sistema de agua potable basta con estimar el valor del volumen por usos ilegales potenciales y restarlo al volumen de pérdidas potenciales totales, para calcular el volumen de fugas potenciales existentes.

Los usos ilegales potenciales son de dos tipos: a) usuarios que se conectan a la red sin autorización del organismo operador del sistema de agua potable, llamados “usuarios clandestinos”, y b) usuarios que construyen alguna modificación en la conexión domiciliaria que se encuentra registrada, “llamados usuarios fraudulentos”.

a) Volumen de pérdidas potenciales por usos clandestinos

La base para el cálculo del valor de estas pérdidas de agua potenciales aparentes, es mediante una inspección física de algunos de los predios de la ciudad, seleccionados con un muestreo aleatorio representativo.

- Con la revisión de campo, se anota si se encontró alguna conexión que no corresponde con los registros del padrón de usuarios.
- Con el número de usuarios clandestinos encontrado, se determina el porcentaje probable, respecto al total de usuarios inspeccionados.

Posteriormente, se determina el volumen de agua que estos usuarios clandestinos deberían consumir, utilizando el consumo unitario promedio de la zona de estudio y extrapolando este porcentaje de usuarios ilegales al total de usuarios de la red del sistema de abastecimiento de agua potable de la localidad.

b) Volumen de pérdidas potenciales por usos fraudulentos

En este caso, del historial de consumos se selecciona a todos los usuarios cuyos registros marquen

consumos inferiores a los 10 m³ por mes. De estos, se selecciona una muestra y se inspecciona cada uno de ellos en campo, para observar si existe o no una conexión ilegal. Con los resultados se determina el volumen de agua que estos usuarios fraudulentos deberían consumir, multiplicando el porcentaje de usos fraudulentos confirmado en la muestra, por el total de usuarios de la localidad y por la diferencia del consumo unitario registrado y el consumo unitario promedio de la zona de estudio.

Ejemplo)

Discriminar el volumen de las pérdidas potenciales totales de agua de 6,045,886 m³, indicado en el Cuadro 2-27, en fugas totales y usos ilegales potenciales, si los datos resultantes de los muestreos de campo son los indicados en el Cuadro 2-29. Además, se estima que los usos fraudulentos que no se han descubierto, reportan consumos de 10 m³/toma/mes.

Cuadro 2-29. Resultados del muestreo de usos ilegales del ejemplo.

Usos clandestinos			Usos fraudulentos		
<i>Zona</i>	<i>Número total estimado de posibles tomas clandestinas en toda la red</i>	<i>Consumo promedio (m³/toma/día)</i>	<i>Zona</i>	<i>Número total estimado de posibles conexiones fraudulentas en toda la red</i>	<i>Consumo promedio (m³/toma/mes)</i>
<i>Residencial</i>	<i>110</i>	<i>0.95</i>	<i>Residencial</i>	<i>187</i>	<i>28.6</i>
<i>Media</i>	<i>320</i>	<i>0.72</i>	<i>Media</i>	<i>827</i>	<i>21.6</i>
<i>Popular</i>	<i>142</i>	<i>0.52</i>	<i>Popular</i>	<i>333</i>	<i>15.6</i>

Solución)

El volumen anual de posibles usos clandestinos residenciales, V_{UCR}, se calcula como:

$$V_{UCR} = 110 \times 0.95 \times 365 = 38,143 \text{ m}^3$$

Y el volumen anual de posibles usos fraudulentos de zona populares, V_{UFP}, será igual a la diferencia del consumo promedio, menos el reportado antes de descubrirlos (10 m³/toma/mes), es decir:

$$V_{UFP} = 333 \times (15.6 - 10) \times 12 = 22,378 \text{ m}^3$$

El resumen del resto de los resultados se presenta en el Cuadro 2-30.

Cuadro 2-30. Volúmenes de pérdidas aparentes potenciales por usos fraudulentos, del ejemplo.

Usos clandestinos			
<i>Zona</i>	<i>Número total estimado de posibles tomas clandestinas en toda la red</i>	<i>Consumo promedio (m³/toma/día)</i>	<i>Volumen de pérdidas aparentes potenciales por usuarios clandestinos (m³)</i>
<i>Residencial</i>	110	0.95	38,143
<i>Media</i>	320	0.72	84,096
<i>Popular</i>	142	0.52	26,952
		Total	149,190

Usos fraudulentos				
<i>Zona</i>	<i>Consumo promedio (m³/toma/mes)</i>	<i>Número total estimado de posibles conexiones fraudulentas en toda la red</i>	<i>Consumo unitario menos 10 m³ mensuales (m³/toma/mes)</i>	<i>Volumen de pérdidas por usuarios no autorizados (m³)</i>
<i>Residencial</i>	28.6	187	18.6	41,738
<i>Media</i>	21.6	827	11.6	11,5118
<i>Popular</i>	15.6	333	5.6	22,378
			Total	179,234

Así, la suma del volumen de pérdidas aparentes potenciales por usos ilegales, VPAP, resulta igual a:

$$V_{PAP} = 149,190 + 179,234 = 328,424 \text{ m}^3$$

Y por lo tanto el volumen de pérdidas reales potenciales por fugas, VPRP, será igual a:

$$V_{PRP} = 6,045,886 - 328,425 = 5,717,461 \text{ m}^3$$

El cual representa el 94.57% de las pérdidas totales potenciales.

2.5.5 Demanda de agua potable

La demanda natural de agua potable, D_{NA}, es igual a la cantidad de agua utilizada por la población, cuando está disponible libremente y con buena calidad en el sistema de abastecimiento, más el volumen de agua de las fugas mínimas en la red.

Esto quiere decir que la demanda natural de agua solo está influenciada por las necesidades intrínsecas de los usos de agua de los habitantes de una localidad y por un nivel mínimo aceptable de fugas en la infraestructura del sistema. En este sentido, el clima, tamaño de la población, nivel socioeconómico, costumbres y grado de desarrollo urbano de la localidad, son las únicas causas que definen el valor de su demanda natural de agua.

La Organización Mundial de la Salud, OMS (*Ref. 2.5*), ha publicado los datos del *Cuadro 2-31*, sobre el consumo y su relación con las condiciones de higiene del ser humano, que son datos de referencia en la planeación y diseño de sistemas de agua potable.

Cuadro 2-31. Valores de consumo relacionados con las condiciones de higiene del ser humano, OMS.

Consumo	Nivel de servicio y medida de acceso	Necesidades satisfechas	Nivel de preocupación de salud
50 L/hab/día	Acceso intermedio: Agua suministrada a través de una toma a una distancia de 100 m o 5 minutos de recorrido.	Higiene personal básica y de alimentos; lavandería y baño también están seguros.	Bajo.
100 L/hab/día	Acceso óptimo: Abastecimiento de agua continuo a través de tuberías y tomas.	Higiene segura en todas las necesidades.	Muy bajo.

Los datos de referencia del consumo no doméstico no son fáciles de precisar, puesto que dependen de cada tipo de uso específico, por ello deben evaluarse en cada localidad de forma particular.

En cuanto al nivel mínimo de fugas, la IWA define que el umbral mínimo de fugas, UMF, es función de la presión hidráulica y las características de las tuberías y tomas domiciliarias contenidas en la red de distribución, y se estima a través de la ecuación siguiente:

$$UMF = \frac{AL_R + BN_T + CL_T}{N_T} p \quad (2.34)$$

Donde:

UMF = Umbral mínimo de fugas (referencia óptima), en L/toma/día.

N_T = Número total de tomas domiciliarias registradas en el sistema de abastecimiento.

A , B y C = Constantes que ponderan la variable que acompañan y que han sido determinadas con un análisis estadístico de veinte países (*Ref. 2.6*); $A = 18$ L/km/día/mca, $B = 0.8$ L/toma/día/mca, $C = 25$ L/km/día/mca.

L_R = Longitud total de las tuberías de la red de distribución, en km.

L_T = Suma de las longitudes de todas las tomas domiciliarias dentro de los predios, en km.

p = Carga de presión hidráulica media en la red de distribución, en mca.

Ejemplo)

Determinar la demanda anual de agua de una localidad que cuenta con un sistema de agua potable, suficiente para asegurar la higiene en todas las necesidades de sus 145,150 habitantes y funcionar con el umbral mínimo de fugas. El sistema tiene instaladas 42,690 tomas domiciliarias con longitud promedio de 5 metros (dentro de los predios), la red funciona con una carga de presión media de 23 mca (2.3 kg/cm²) y las tuberías miden 430 kilómetros; considere que no existen usos no domésticos en la localidad.

Solución)

Del Cuadro 2-31 se obtiene que el consumo que asegura la higiene de todas las necesidades de los habitantes es igual a 100 L/hab/día, que multiplicado por los 145,150 habitantes se calcula el consumo de demanda diario, C_{Dd} , es decir:

$$C_{Dd} = \frac{100 \times 145,150}{1,000} = 14,515 \text{ m}^3 / \text{ día}$$

Utilizando la ecuación 2.34 se estima el umbral mínimo de fugas, como sigue:

$$UMF = \frac{18 \times 430 + 0.8 \times 42,690 + 25 \times 42,690 \times 5 / 1000}{42,690} \times 23 = 25.44 \text{ L / toma / día}$$

Que en metros cúbicos por día resulta:

$$F = \frac{25.44 \times 42,690}{1,000} = 1,086 \text{ m}^3 / \text{ día}$$

Finalmente, la demanda natural de agua anual, D_{NA} es:

$$D_{NA} = (14,515 + 1,086) \times 365 = 5,694,365 \text{ m}^3 / \text{ año}$$

Y el nivel de fugas correspondiente al umbral mínimo, NF_{UM} es:

$$NF_{UM} = \left(1 - \frac{14,515}{(14,515 + 1,086)} \right) \times 100 = 7\%$$

En México, la Conagua ha determinado como nivel mínimo aceptable de fugas un valor fijo para todas las ciudades, entre el 15% y 20% del volumen suministrado.

Las posibles deficiencias en el sistema de abastecimiento de agua potable, tales como: presiones hidráulicas inadecuadas, mala calidad del agua, discontinuidad del servicio, desequilibrio en la distribución del agua, alto deterioro de la red, baja cobertura de micromedición, rezagos en el cobro del servicio, tarifas inadecuadas, desperdicio intradomiciliario, aunadas a la falta de cultura en el manejo del agua por parte de los habitantes de la localidad, ocasionan alteraciones importantes al valor de la demanda natural de agua potable.

La demanda de agua potable sujeta a las condiciones operacionales existentes del sistema de abastecimiento, se denomina “demanda actual de agua potable”. Es igual a la cantidad de agua promedio anual que se entrega al total de habitantes de una localidad en la condición operacional de su sistema de abastecimiento de agua potable, incluida el agua que se utiliza para comercios, industrias, riego público, etc., más el agua que se pierde en el transporte y distribución del agua.

Por lo tanto, la demanda actual de agua potable, D_{AAP} , se calcula con la suma del consumo total anual, más el volumen de las fugas potenciales que existen en el sistema de abastecimiento, es decir:

$$D_{AAP} = C_D + C_{ND} + F \quad (2.35)$$

Donde:

C_D = Consumo doméstico promedio anual existente en el sistema, en m³.

C_{ND} = Consumo no doméstico promedio anual existente en el sistema, en m³.

F = Volumen anual de fugas potenciales en el sistema, en m³.

Los componentes de la demanda de agua actual, DAAP, se obtienen a través de un estudio estadístico de consumos y de la aplicación de un balance hídrico, para el año histórico inmediato (año 1) a la fecha del proyecto de sectorización en turno.

En el proceso de planeación y diseño de la sectorización de la red del sistema de agua potable es necesario hacer una proyección hacia el futuro de la demanda de agua actual, para conocer los requerimientos de agua que tendrá que proporcionar el sistema en los años venideros.

La demanda futura de agua, DFAP, se calcula con base en una proyección en el tiempo de los distintos usos del agua y del nivel de ocurrencia de fugas esperado; se utiliza la siguiente ecuación:

$$D_{FAP,i} = (P_i \cdot C_{D,i} + C_{ND,i}) \cdot \frac{100}{100 - F_i} \quad (2.36)$$

Donde:

$D_{FAP,i}$ = Demanda futura de agua para ser abastecida por el sistema en el año i, en m³/año.

P_i = Población total servida, estimada en el año i, en número de habitantes.

$CD_{,i}$ = Consumo doméstico unitario en el año i, en m³/hab/año.

$CND_{,i}$ = Consumo no-doméstico en el año i, en m³/año.

F_i = Porcentaje del volumen de fugas potenciales en el año i, respecto al volumen suministrado, en %.

Cada uno de los términos de la ecuación 2.36 pueden ser subdivididos cuando hay suficientes datos; por ejemplo: el consumo doméstico puede ser separado por clases socioeconómicas; el consumo no doméstico en industrias, hoteles, comercios, servicios públicos, etc.; y las fugas potenciales en los diferentes elementos del sistema, eso es, fugas en tomas domiciliarias, en tuberías y en cajas de válvulas.

Si el valor de la demanda de agua futura obtenida no es aceptable, porque ocasiona la sobreexplotación de la disponibilidad de agua en la región, o encarece el servicio, o provoca una operación deficiente, entonces se traza un plan para modificar el curso de estos eventos futuros, enfocado hacia el uso eficiente del agua de los usuarios y la reducción y control de fugas en la red.

Los valores de consumos unitarios reportados en la bibliografía técnica (descritos en el inciso 2.5.2 - b.2) pueden ser utilizados como valores de tendencia o direccionadores, para realizar proyecciones de la demanda futura de agua.

Ejemplo)

Una cierta localidad consume actualmente los siguientes volúmenes de agua al año: uso doméstico = 5,090,000 m³/año; uso comercial = 748,850 m³/año; uso industrial = 531,900; usos públicos 290,000 m³/año. La proyección de la población anual, que se tiene en el período de diseño de diez años, se

muestra en el Cuadro 2-32; el porcentaje de habitantes servidos es de 97% y es constante en todo el periodo.

Cuadro 2-32. Proyección de población de la localidad del ejemplo.

Año	No. Habitantes
2013	75,000
2014	77,537
2015	78,906
2016	80,286
2017	81,677
2018	83,080
2019	84,494
2020	85,920
2021	87,358
2022	88,809
2023	90,272

Se ha estimado que el crecimiento anual del consumo comercial será de 0.45%, del consumo industrial de 1.8% y del consumo de usos públicos de 3.3%. Se tiene además que del balance hídrico resultó un nivel actual de fugas potenciales del 27.3 % del agua suministrada al sistema de abastecimiento de agua potable. Determinar la demanda anual de agua futura, hasta el periodo de diseño, suponiendo que se mantienen los valores actuales del consumo unitario doméstico y del nivel de fugas potenciales en el sistema; graficar el resultado.

Solución)

Se determina el consumo unitario doméstico, utilizando la ecuación 2.27, esto es:

$$Cu_i = \frac{Vc_i}{N_{RMC}} = \frac{5,090,000 \text{ m}^3 / \text{año} \times 1,000 \text{ Litros} / \text{m}^3}{365 \text{ días} / \text{año} \times 0.97 \text{ cobertura} \times 75,000 \text{ habitantes}} = 191.69 \text{ L} / \text{hab} / \text{día}$$

Aplicando la ecuación 2.36 se calcula la demanda total anual para el año actual 2013, resultando lo siguiente:

$$D_{FAP,i} = \left(P_i \cdot C_{D,i} + C_{ND,i} \right) \cdot \frac{100}{100 - F_i} = \left[(0.97 \times 75,000 \times \frac{191.69 \times 365}{1,000}) + (748,850 + 531,900 + 290,000) \right] \cdot \frac{100}{100 - 27.3} = 9,161,967 \text{ m}^3 / \text{año}$$

Ahora, de forma similar se calculan las demandas futuras, desde el año 2014 hasta el 2023, resultando los valores mostrados en el Cuadro 2-33.

Cuadro 2-33. Proyección de la demanda de agua del ejemplo

Concepto	Año actual 2013	2014	2015	...	2022	Año final 2023
Población (habitantes)	75,000	77,537	78,906	...	88,809	90,272
Población servida (habitantes)	72,750	75,211	76,539	...	86,145	87,564
Consumo doméstico (m ³ /año)	5,090,000	5,262,544	5,355,460	...	6,027,590	6,126,886
Consumo comercial (m ³ /año)	748,850	752,220	755,605	...	779,730	783,239
Consumo industrial (m ³ /año)	531,900	541,474	551,221	...	624,540	635,781
Servicios públicos (m ³ /año)	290,000	299,570	309,456	...	388,419	401,237
Demanda total (m ³ /año)	9,161,967	9,430,272	9,589,740	...	10,756,917	10,931,421
Volumen de fugas (m ³ /año)	2,501,217	2,574,464	2,617,999	...	2,936,638	2,984,278

Notas:

Cobertura de población servida = 97.0%

Consumo unitario doméstico (L/hab/día) = 191.69

Tasa de crecimiento consumo comercial = 0.45%

Tasa de crecimiento consumo industrial = 1.80%

Tasa de crecimiento consumo Público = 3.30%

Porcentaje de fugas = 27.30%

En la gráfica de la Figura 2-47 se presentan los datos y resultados de la demanda total.

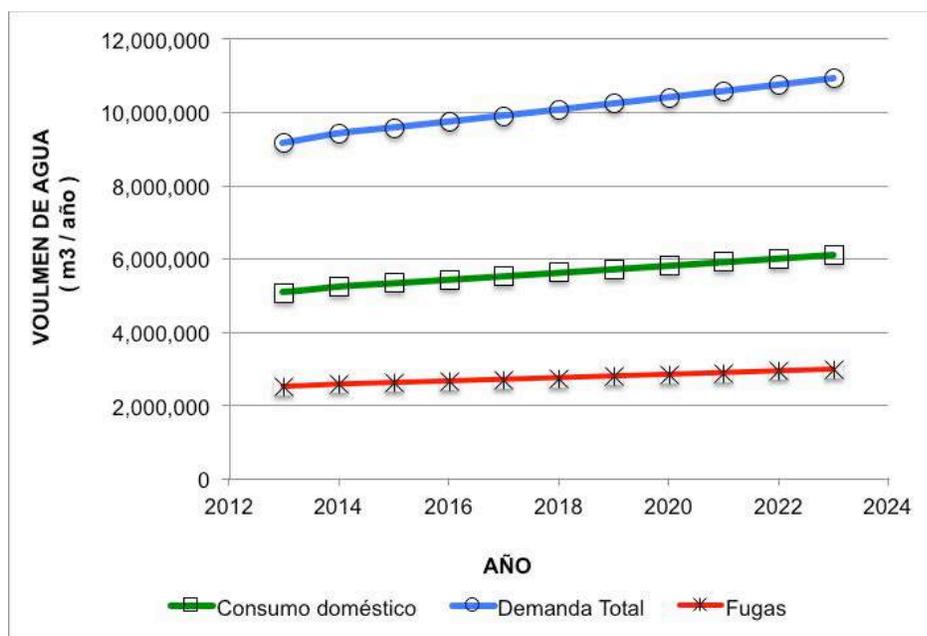


Figura 2-47. Gráfica de datos y resultados de la demanda de agua total del ejemplo.

2.5.6 Dotación y gasto medio diario

2.5.6.1 Dotación de agua

La dotación es la cantidad de agua asignada a cada habitante, considerando todos los consumos de los usuarios (domésticos y no domésticos) y las fugas de agua en el sistema, en un día medio anual; sus unidades están dadas en L/hab/día.

La dotación, Dot , se determina dividiendo el valor de la demanda anual de agua entre el número de habitantes de la localidad, y por el factor de unidades respectivo, o sea:

$$Dot_i = \frac{D_i \times 1,000}{365 \times P_i} \quad (2.37)$$

Donde:

Dot_i = Dotación en el año i , en L/hab/día.

D_i = Demanda de agua en el año i , en m^3 /año.

P_i = Número de habitantes servidos con agua potable en la localidad, en el año i .

En el cálculo de la dotación actual de agua, Dot_{AAP} , la demanda de agua que se considera corresponde exactamente con el volumen total suministrado al sistema de abastecimiento de agua potable, V_{SV} , es decir:

$$Dot_{AAP} = \frac{V_{SV} \times 1,000}{365 \times P_i} \quad (2.38)$$

En la planeación de sectores de la red de distribución, donde se establece que el nivel actual de fugas potenciales será reducido a un cierto nivel de fugas mínimo, se utiliza la siguiente ecuación para calcular la dotación de diseño:

$$Dot_i = \frac{Cu_{doméstico, i} + Cu_{no-doméstico, i}}{1 - \frac{F_i}{100}} \quad (2.39)$$

Donde:

Dot_i = Dotación en el año de planeación i , en L/hab/día.

$Cu_{doméstico, i}$ = Consumo unitario doméstico en el año de planeación i , en L/hab/día.

$Cu_{no-doméstico, i}$ = Consumo unitario no doméstico en el año de planeación i , en L/hab/día.

F_i = Porcentaje de fugas potenciales en el año de planeación i , en %.

Ejemplo)

En un sistema de agua potable se ha determinado que la demanda de agua que se tendrá en el año 2015 es de 9,589,740 metros cúbicos, compuesta por 5,355,460 m^3 de consumo doméstico, 1,616,281 m^3 de consumo no doméstico y 2,617,999 m^3 de fugas potenciales; la población esperada en ese mismo año

se ha estimado en 76,539 habitantes servidos. Determinar la dotación correspondiente a ese año, para el volumen de fugas indicado, y la dotación de agua si se reducen las fugas potenciales al 20% del volumen suministrado.

Solución)

La dotación de agua para el año 2015 con el volumen de fugas potenciales de 2,617,999 m³, se obtiene aplicando la ecuación 2.37, como sigue:

$$Dot_{2015} = \frac{D_{2015} \times 1,000}{365 \times P_{2015}} = \frac{9,589,740 \times 1,000}{365 \times 76,539} = 343.27 \text{ L / hab / día}$$

También, se puede calcular aplicando la ecuación 2.39, para lo cual se deben determinar los consumos unitarios doméstico y no doméstico, y el porcentaje de fugas asociado, esto es:

$$Cu_{doméstico, 2015} = \frac{5,355,460 \times 1,000}{365 \times 76,539} = 191.7 \text{ L / hab / día}$$

$$Cu_{No-doméstico, 2015} = \frac{1,616,281 \times 1,000}{365 \times 76,539} = 57.85 \text{ L / hab / día}$$

$$F_{2015} = \frac{2,617,999}{9,589,740} \times 100 = 27.3 \%$$

Sustituyendo valores, se obtiene que la dotación del año 2015 resulta igual a:

$$Dot_{2015} = \frac{Cu_{doméstico, 2015} + Cu_{no-doméstico, 2015}}{1 - \frac{F_{2015}}{100}} = \frac{191.7 + 57.85}{1 - \frac{27.3}{100}} = \frac{249.55}{0.727} = 343.26 \text{ L / hab / día}$$

Que es el mismo resultado que con la ecuación 2.37. Ahora para el nivel de fugas del 20%, la dotación del año 2015 será la siguiente:

$$Dot_{2015} = \frac{191.7 + 57.85}{1 - \frac{20.0}{100}} = \frac{249.55}{0.8} = 311.9 \text{ L / hab / día}$$

2.5.6.2 Gasto Medio Diario

El Gasto Medio Diario, Q_m , es la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades de una población en un día de consumo promedio, y se calcula para cualquier año del horizonte de planeación,

con la ecuación:

$$Q_{m,i} = \frac{Dot_i \times P_i}{86,400} \quad (2.40)$$

Donde:

$Q_{m,i}$ = Gasto medio diario en el año i, en (L/s).

Dot = Dotación en el año i, en (L/hab/día).

P_i = Número de habitantes servidos con agua potable en la localidad, en el año i.

86,400 = Factor de conversión de unidades (s/día).

El gasto medio diario es el parámetro básico del análisis hidráulico y el dimensionamiento de las obras de sectorización de la red de agua potable. Como se tratará más adelante, este gasto o caudal medio diario presenta variaciones espaciales en el sistema y temporales durante las horas del día y a lo largo del año, que deberán considerarse en la planeación y diseño de sectores hidrométricos de la red de distribución de agua potable.

2.5.7 Estrategias para equilibrar la oferta con la demanda de agua

La oferta hídrica es la cantidad de agua promedio anual disponible y aprovechable para abastecer a una determinada comunidad. Se compone del agua que se suministra al sistema de abastecimiento con las captaciones existentes (oferta hídrica aprovechada), más la que puede ser explotada por nueva infraestructura en la misma fuente o en alguna otra (oferta hídrica potencial).

Como se mencionó en el *inciso 2.5.5*, la demanda actual de agua potable es la cantidad de agua promedio anual que requieren el conjunto de habitantes de una localidad, incluida el agua para actividades no domésticas, en la condición operacional de su sistema de abastecimiento de agua potable, más el agua que se pierde en transporte y distribución del agua.

Es claro, entonces, que debe existir un equilibrio entre la demanda y el suministro de agua, para que un sistema de abastecimiento de agua potable cumpla su propósito y sea sostenible.

En el análisis entre la oferta y demanda existen dos momentos importantes a considerar: el estado actual o diagnóstico, y la situación futura o pronóstico.

Con la aplicación del balance hídrico, descrita en el *inciso 2.5.4*, es posible determinar para la condición actual, o de diagnóstico, los valores de consumo de agua, el volumen de fugas y la cantidad de agua suministrada en el sistema de agua potable.

Dependiendo de los resultados del análisis y considerando que el nivel aceptable de fugas potenciales es del 20% del volumen suministrado, se pueden presentar tres posibles escenarios del estado actual entre la demanda y suministro de agua en un sistema de agua potable:

- a) Escenario A: demanda MAYOR que el suministro.
- b) Escenario B: demanda IGUAL que el suministro.
- c) Escenario C: demanda MENOR que el suministro.

En las *Figura 2-48 a Figura 2-50* se presentan gráficas que reflejan estos tres escenarios, ejemplificados con valores supuestos para su mejor comprensión.

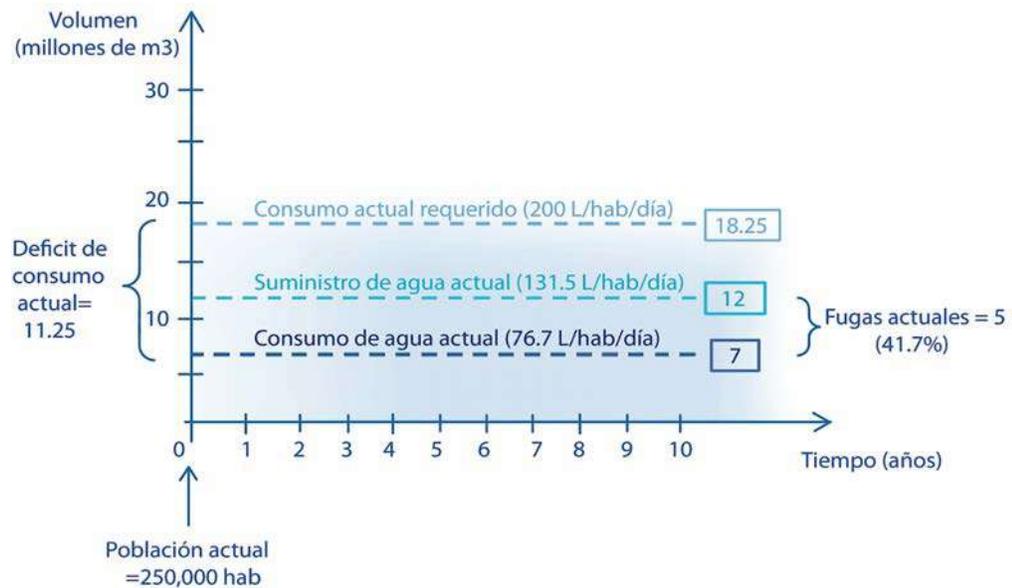


Figura 2-48. Escenario A: demanda MAYOR que el suministro de agua.
Fuente: propia.

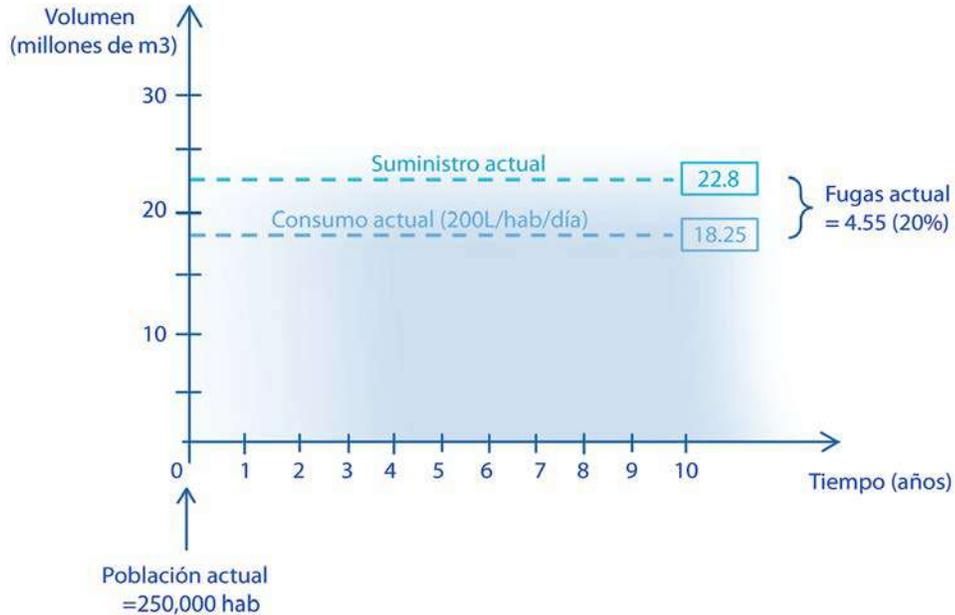


Figura 2-49. Escenario B: demanda IGUAL que el suministro de agua.
Fuente: propia.

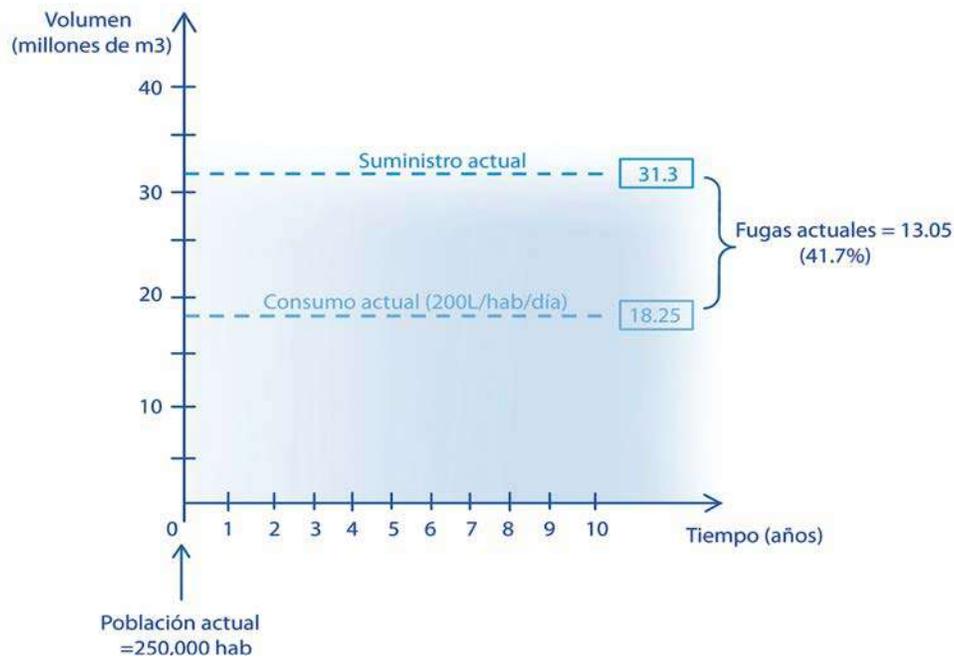


Figura 2-50. Escenario C: demanda MENOR que el suministro de agua.
Fuente: propia.

Con fines de mejoramiento, es importante realizar la estimación de la demanda y suministro de agua a futuro; así, se determinarán las necesidades de los usuarios y evaluará si dicho suministro es suficiente o deberá ampliarse utilizando la oferta potencial de agua de la región, para alcanzar el equilibrio entre la oferta y demanda de agua en el sistema de abastecimiento.

La oferta potencial de agua se obtiene con un estudio hidrológico de las fuentes de agua disponibles a nivel cuenca o acuífero, y el suministro de agua con una evaluación de la capacidad útil de la infraestructura de captación existente en el sistema. La predicción de la demanda de agua se realiza en función de la población esperada en el período acordado; la cobertura del servicio; el crecimiento industrial, comercial y de servicios públicos de la localidad en ese lapso, y las acciones de eficiencia volumétrica de agua que se implementen.

En caso de que exista un desbalance entre el suministro y demanda de agua, se lleva a cabo un plan de acciones para equilibrarlo, primeramente pensando en elevar la eficiencia volumétrica de agua (reducción de fugas, disminución de consumos con dispositivos ahorradores, reúso de agua residual en riego de áreas verdes públicas y en procesos industriales, etc.) y posteriormente en incrementar el suministro actual, con ampliación y rehabilitación de captaciones existentes o con nueva infraestructura, para la explotación de nuevas fuentes de abastecimiento.

En las Figura 2-51 a Figura 2-53 se muestran las gráficas respectivas de los tres escenarios anteriores, indicando cómo se puede equilibrar a futuro el suministro de agua con la demanda de forma más efectiva si se reducen las fugas existentes a un nivel aceptable (la población futura es supuesta). Como se observa, en el caso del escenario A, donde la demanda es mayor que el suministro, para alcanzar el equilibrio es preciso realizar simultáneamente un aumento del caudal suministrado y una reducción de fugas; en el escenario B, solamente se necesita mantener el nivel de fugas y prever nuevas obras de captación para suministrar agua a la población futura; en el escenario C, es indispensable reducir el nivel de fugas y conservar el mismo caudal suministrado actual.

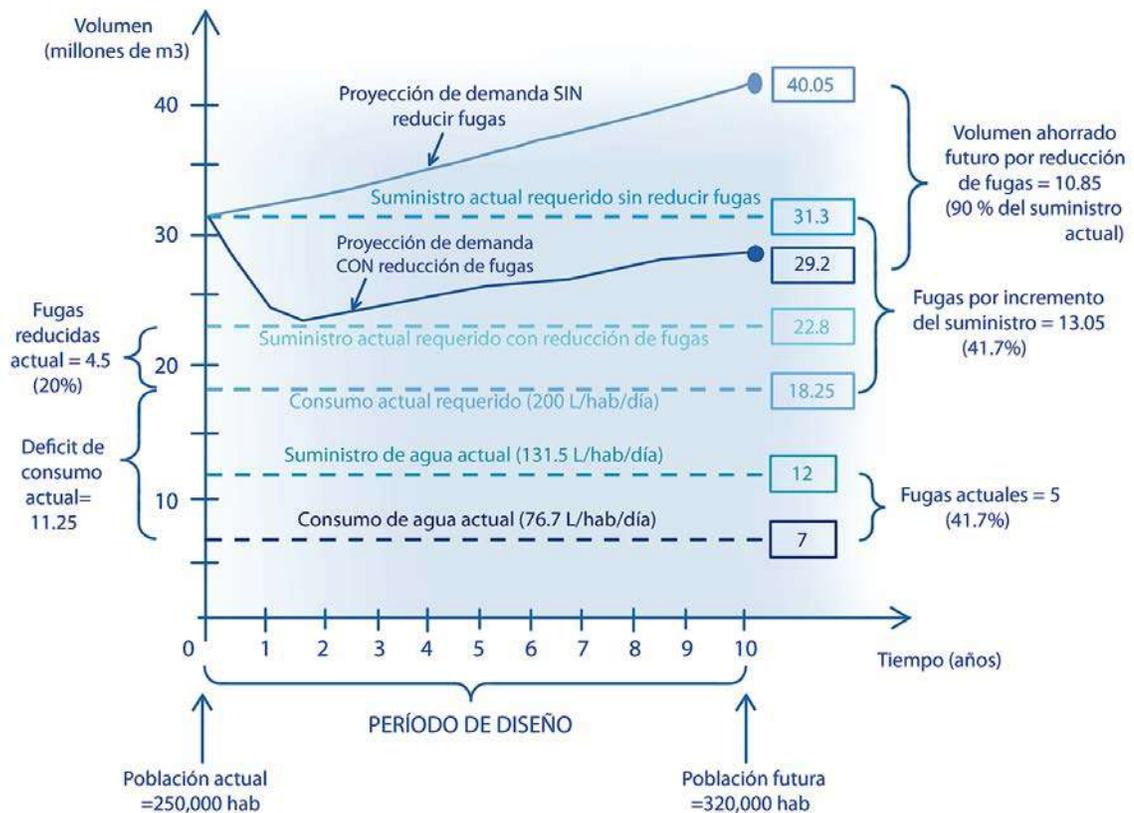


Figura 2-51. Escenario A: demanda MAYOR que la oferta actual; proyección de la demanda de agua con y sin reducción de fugas.

En este escenario A, existe al inicio del análisis un déficit de consumo de 11.25 millones de m³ al año. Para cubrirlo es necesario incrementar el suministro de agua a 31.28 millones de m³, de los cuales se desperdiciarán 13.05 millones de m³ en fugas. Se estima que, de continuar con el mismo nivel de fugas, en diez años la demanda de agua alcanzaría los 40.05 millones de m³ anuales. Sin embargo, con un programa de reducción de fugas del 41.7 al 20% en los dos primeros años, la demanda de agua futura se reduciría a 29.2 millones de m³, con un ahorro de agua de 10.85 millones de m³, cantidad de agua casi del mismo orden del suministro actual. En este caso, de todos modos es necesario incrementar la capacidad de la infraestructura de suministro de agua.

En este escenario B, el valor de fugas actual del 20% deberá mantenerse durante los años futuros, para que al final del período de diseño la demanda de agua tenga un valor de 29.2 millones de m³ y la pérdida por fugas sea de 5.84 millones de m³ de agua. De todas maneras, será necesario desarrollar nueva infraestructura de captación de agua.

Por último, en el escenario C se pueden ahorrar 2.1 millones de m³ si se implementa un programa de reducción de fugas durante los dos primeros años, y si se mantiene a lo largo del período de diseño se obtendrá una demanda de agua de 29.2 millones de m³ y no será necesario ampliar la infraestructura de captación del sistema, ni explotar nuevas fuentes de abastecimiento disponibles.

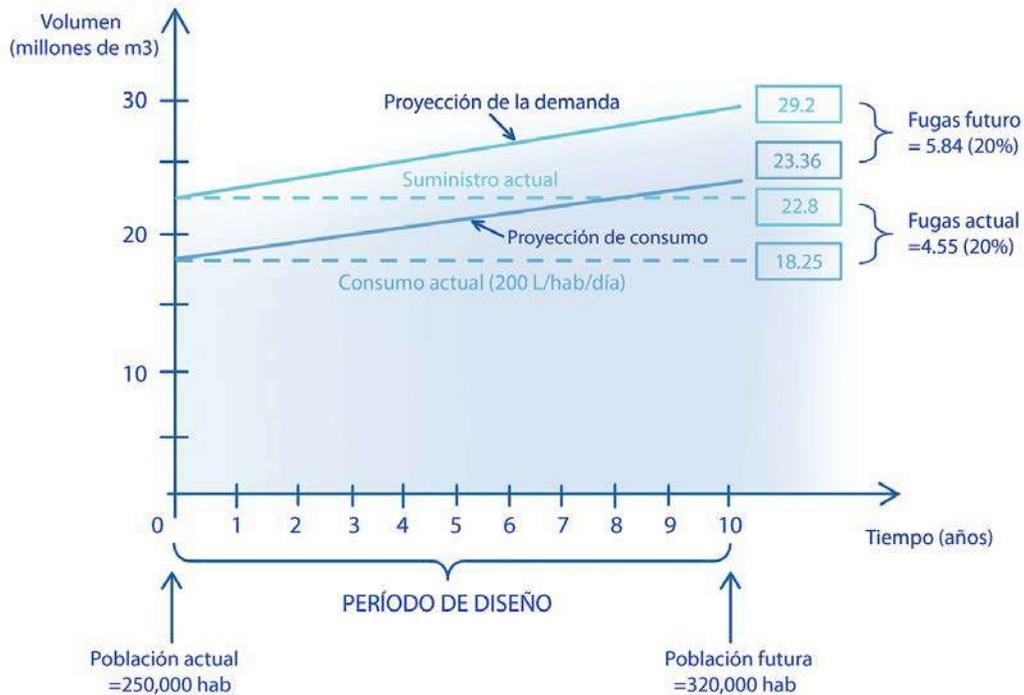


Figura 2-52. Escenario B: demanda IGUAL que la oferta actual; proyección de la demanda de agua manteniendo el nivel de fugas.

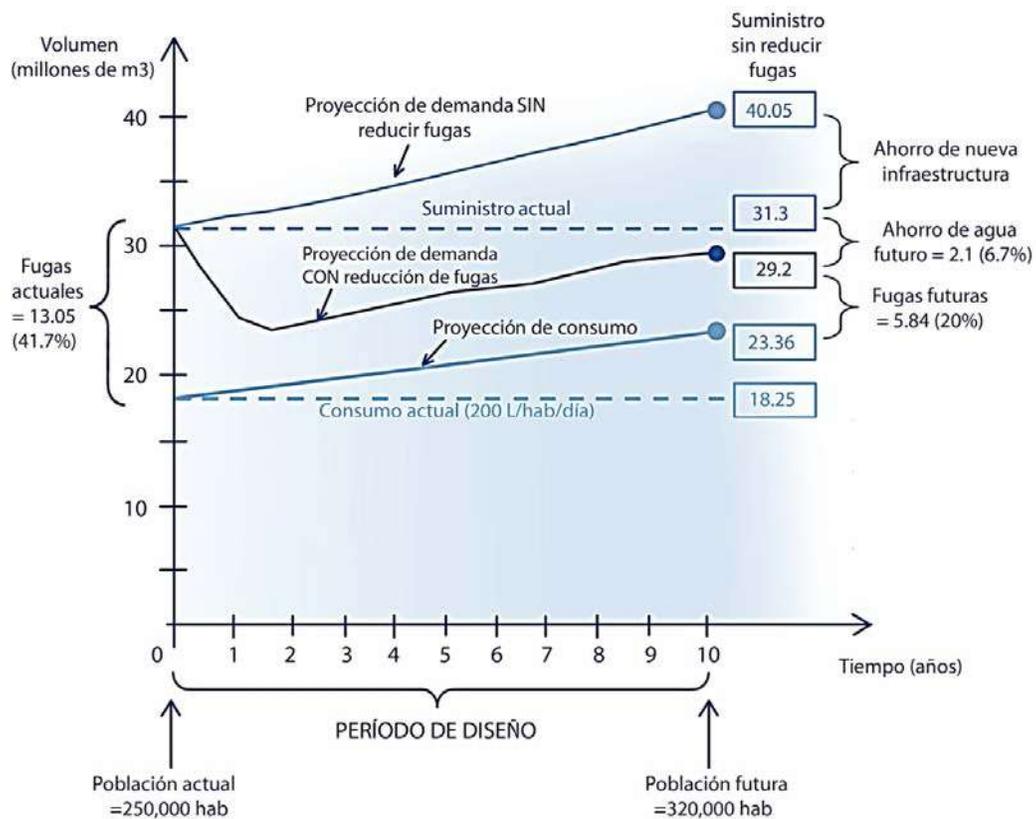


Figura 2-53. Escenario C: demanda MENOR que la oferta actual; proyección de la demanda de agua con y sin reducción de fugas.

2.5.8 Solución ante las variaciones temporales y espaciales del agua en el sistema de abastecimiento

2.5.8.1 Variación temporal del agua

El caudal de consumo de agua de una población cambia con las estaciones del año, los días de la semana y las horas del día (Figura 2-54 y Figura 2-55). El caudal de consumo de agua aumenta en verano por las altas temperaturas y disminuye en invierno. Las costumbres y actividades diarias provocan que el consumo varíe del domingo al sábado. Y durante el día es mayor el consumo que por la noche.

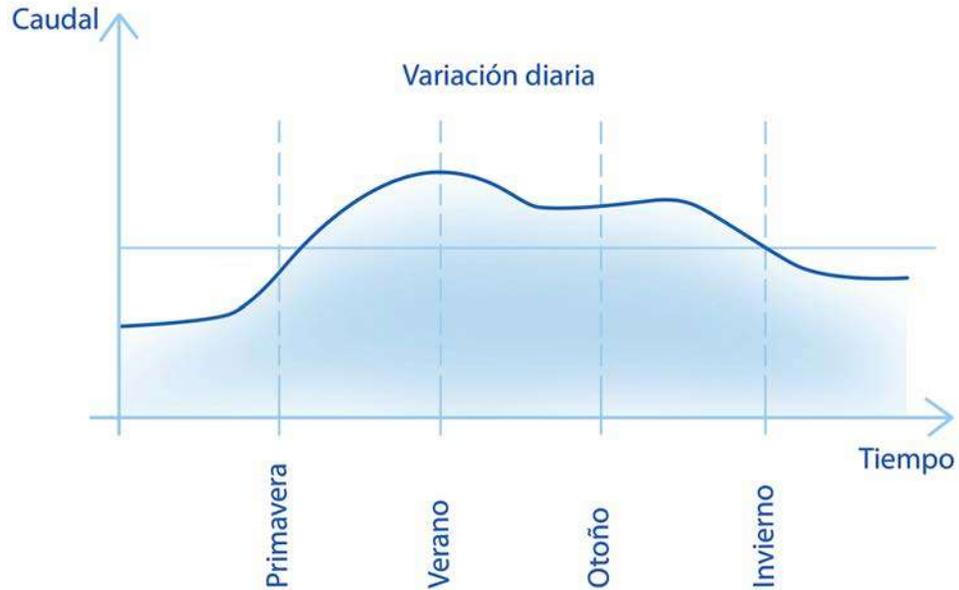


Figura 2-54. Curva típica de variación diaria del caudal de consumo de una población.

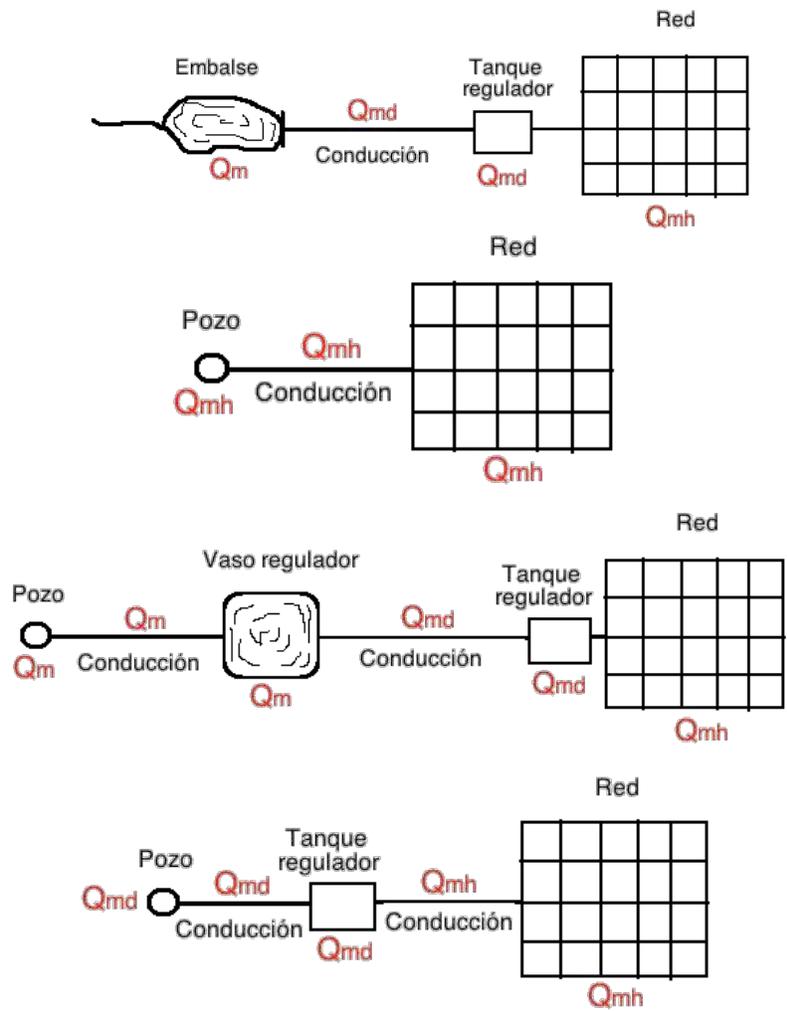


Figura 2-55. Curva típica de variación del caudal de consumo de una población.

El agua de las fuentes de abastecimiento también varía según la época del año, en estiaje disminuyen los escurrimientos y los acuíferos bajan su nivel, mientras en temporada de lluvia, sucede lo contrario.

En este contexto, el sistema de abastecimiento de agua potable debe estar preparado para garantizar estas variaciones de consumo de agua de la población y adecuarse a la disponibilidad de la fuente de abastecimiento durante su operación. Entonces, surge una pregunta al respecto ¿Cuál es el caudal que se debe aplicar en la planeación y diseño de las obras del sistema de agua potable?

La respuesta correcta consiste en extraer de la fuente de abastecimiento de agua el caudal medio diario, garantizado en su época de estiaje y correspondiente con la demanda anual de la población, y construir obras que regulen los cambios diarios y horarios del consumo. En la *Figura 2-56* se muestran algunos esquemas de sistemas de abastecimiento con los caudales que deben aplicarse en la planeación y diseño del sistema de agua potable.



Q_m = Gasto medio diario
 Q_{md} = Gasto máximo diario
 Q_{mh} = Gasto máximo horario

Figura 2-56. Esquemas de sistemas de abastecimiento con distintas condiciones de gastos a utilizar en el planeación y diseño del sistema de agua potable.

Obsérvese que la red de distribución siempre será diseñada con el gasto máximo horario, mientras que en el resto de las obras dependerá del arreglo de cada sistema de abastecimiento.

Por ejemplo: un pozo que suministra agua directamente a la red deberá ser diseñado con el gasto máximo horario, mientras que en uno que suministre el agua a un tanque regulador se diseñará y operará con el gasto máximo diario.

Los gastos máximo diario y máximo horario se obtienen a partir del gasto medio diario con las expresiones siguientes:

$$Q_{Md} = C_{v_d} \cdot Q_m \quad (2.41)$$

$$Q_{Mh} = C_{v_h} \cdot Q_{Md} \quad (2.42)$$

Donde:

Q_{Md} = Gasto máximo diario, en l/s.

Q_{Mh} = Gasto máximo horario, en l/s.

C_{v_d} = Coeficiente de variación diaria.

C_{v_h} = Coeficiente de variación horaria.

Q_{med} = Gasto medio diario, en l/s.

Los valores de los coeficientes de variación diaria y horaria son únicos para cada localidad. En la estimación del valor del coeficiente de variación diaria se requieren mediciones diarias del caudal suministrado a la red, al menos durante un año completo, para considerar todas las variaciones del clima estacional. El coeficiente de variación diaria se obtiene al dividir el gasto medio del día con mayor caudal registrado, entre el gasto medio (promedio de los gastos medios diarios registrados en todo el año, *Figura 2-57*).

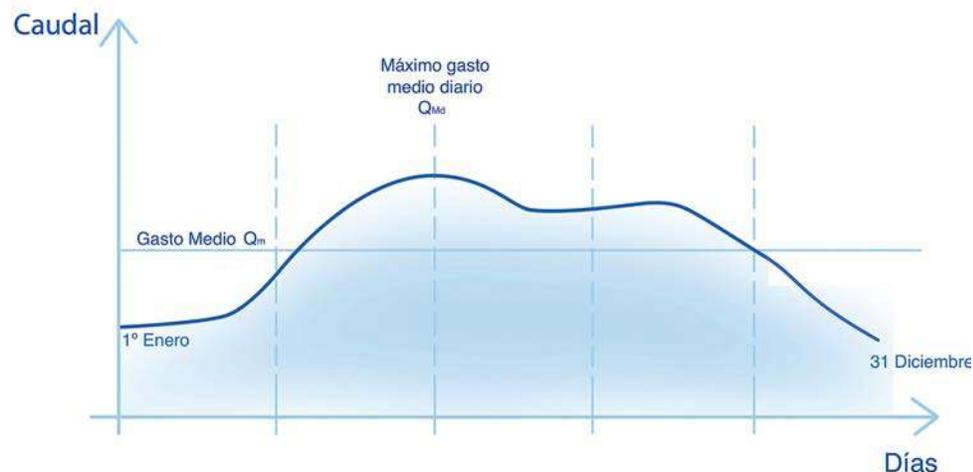


Figura 2-57. Curva de gastos medios diarios para calcular el coeficiente de variación diaria.

Por su parte, el valor del coeficiente de variación horaria se estima a partir del registro del día de máximo gasto medio diario, dividiendo el mayor caudal medido en las 24 horas de ese día, entre dicho máximo gasto medio diario (*Figura 2-58*). De esta manera, se considerarán las variaciones matutinas, diurnas y nocturnas en el uso del agua, en el día de máximo consumo ocurrido en el año.

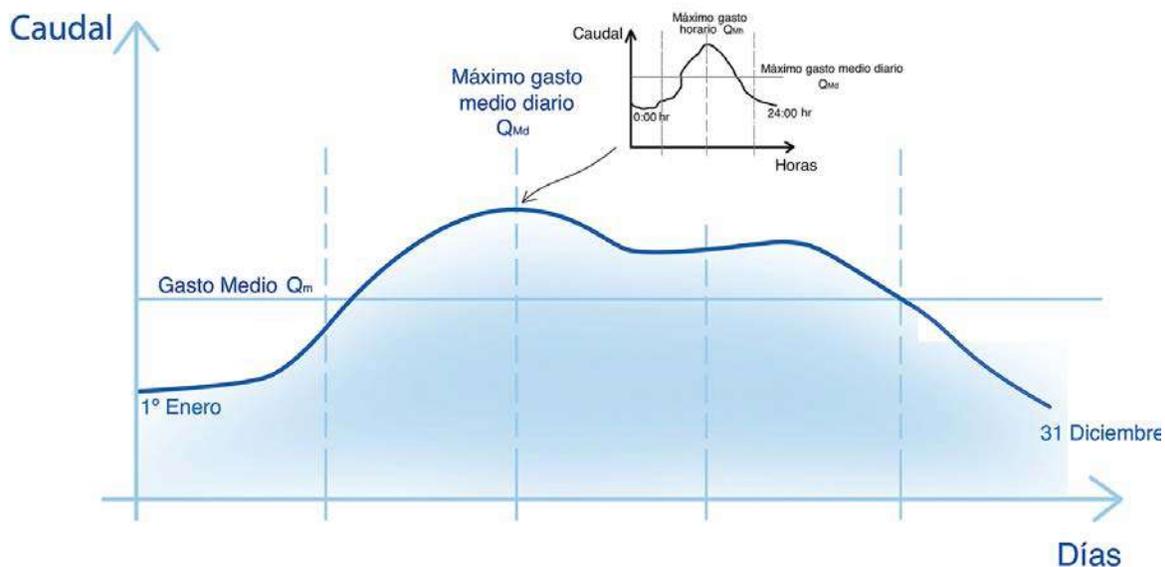


Figura 2-58. Curva de gastos horarios en el día de máximo caudal medio diario, para calcular el coeficiente de variación horaria.

Se recomienda que las mediciones se realicen en algún pozo que suministre directamente el agua a la red, o bien, a la salida de un tanque de regulación con una zona de influencia definida, preferentemente con un bajo nivel de fugas.

Sin embargo, en muchos sistemas de agua potable no tienen las facilidades o el tiempo suficiente para realizar mediciones de caudal a lo largo de todo un año, para determinar las variaciones diarias y horarias del caudal. En esta situación, es posible efectuar una aproximación del coeficiente de variación horaria, a través de una campaña de medición de corta duración, por ejemplo, durante una semana; y para el coeficiente de variación diaria, realizar un análisis estadístico con los registros disponibles en las obras de captación; por ejemplo: procesando los datos de caudales suministrados en los medidores instalados en los pozos.

En el último de los casos, si no se tiene disponibilidad para obtener datos particulares de la localidad en estudio, se recomienda aplicar valores publicados en especificaciones técnicas. La Comisión Nacional del Agua, en su *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* reporta los siguientes valores promedio de ambos coeficientes (Ref. 2.1), que se han obtenido con un estudio en varias ciudades mexicanas.

- Coeficiente de variación diaria = $Cv_d = 1.40$.
- Coeficiente de variación horaria = $Cv_h = 1.55$.

Como se observa, en general en la República Mexicana el máximo consumo diario se registra entre mayo y julio, con valores promedio del 40% sobre el consumo medio anual. Mientras que el consumo máximo horario se presenta entre las 7:00 am y las 16:00 pm, con valores promedio del 55% sobre el gasto máximo diario.

Aunque se pueden aplicar estos valores en la planeación y diseño de sistemas de agua potable cuando no hay ningún dato particular, se insiste en la importancia y la necesidad de obtener los valores de los

coeficientes de variación diaria y horaria para cada localidad, basados en registros de medición continua en la red de distribución.

2.5.8.2 Variación espacial del agua

La variación espacial del agua en un sistema de abastecimiento de agua potable solo ocurre significativamente en la red de distribución. La especificación del diseño de redes indica que se debe disponer de una presión mínima en todos los puntos de la red las 24 horas. Entonces, al cumplir con esta especificación de diseño y dependiendo de la topografía del lugar, cuando el sistema se encuentra en operación hay solo algunos puntos de la red con esta presión mínima en la hora de máxima demanda de agua de los usuarios, en el resto de las tuberías es mayor. Asimismo, durante la noche la demanda de agua será mínima, por lo tanto las presiones se incrementarán considerablemente en todos los puntos de la red: ¿Qué hacer entonces para controlar estas variaciones de presión y mantener más homogéneo el sistema?

Este problema puede solucionarse a través de la instalación de válvulas reductoras de presión y variadores de velocidad en pozos y rebombes que suministran el agua directamente a la red de distribución. En la actualidad, existen en el mercado diversas marcas comerciales de estos accesorios, pero es necesario realizar un proyecto para garantizar su funcionalidad.

Otra situación que se presenta en algunos sistemas es que se acostumbra a operar manualmente las válvulas y bombas para variar el flujo y las presiones, lo que conduce a condiciones de operación que generan fugas en los puntos vulnerables de la red y las tomas domiciliarias, así como presiones negativas o sobrepresiones repentinas en las tuberías (golpe de ariete).

El control de la presión y la velocidad del agua en la red son fundamentales para la calidad del sistema, porque garantizan un buen servicio al usuario y conservan la infraestructura. Sin embargo, muchos sistemas han crecido en forma desordenada y precaria, y es difícil que se pueda asegurar que en todos sus puntos se cuente con la velocidad y presión operando en rangos adecuados.

Finalmente, la existencia de tinacos y cisternas es una evidencia de la falta de capacidad del sistema para garantizar un abasto permanente de agua en un rango de presión; aunque estos accesorios han permitido lidiar con las difíciles condiciones hidrológicas y socioeconómicas de muchas localidades, en las que el abasto continuo a presión es difícil de lograr, es cierto que en un sistema convencional los tinacos no serían necesarios; en donde los hay, el organismo operador debe promover frecuentemente su limpieza y mantenimiento por parte del usuario.

2.5.9 Evaluación de caudales suministrados y demandados en zonas de la red

2.5.9.1 Método de evaluación espacial de caudales en la red

El “*Balance de caudales*” es un método para evaluar la disponibilidad espacial del agua en la red de agua potable contra la demanda de agua de la población en zonas de la ciudad. El resultado del balance de caudales ayuda a visualizar en qué zonas de la red existen problemas de abastecimiento de agua potable en la red, y si es necesario planear el equilibrio entre el suministro y demanda de agua esas zonas de la ciudad. En la planeación de la sectorización de red es necesario aplicar el balance de caudales, tanto para conocer la situación actual de la distribución del agua en la red, como para evaluar si con la propuesta

de la operación del sistema a futuro se logra el equilibrio entre el suministro de agua y los requerimientos de consumo de la población.

Para ilustrar el método, supóngase que se tiene una ciudad ficticia con una distribución espacial de caudales (en porcentaje) de demanda de agua potable de la población, que incluyen a los gastos de las fugas, como se muestra en la *Figura 2-59* y *Cuadro 2-34*.

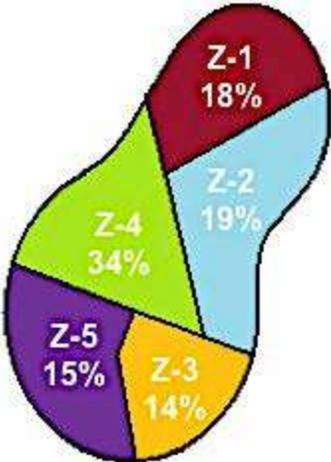


Figura 2-59. Distribución espacial de caudales (en porcentaje) de demanda por la población de una ciudad ficticia; incluyen gastos de fugas.

Cuadro 2-34. Distribución espacial de caudales (en porcentaje) de demanda por la población de una ciudad ficticia; incluyen gastos de fugas.

Zona 1		Zona 4	
Colonia	5.0	Colonia	6.0
Colonia	13.0	Colonia	5.0
<i>Total</i>	18.0	Colonia	8.0
Zona 2		Colonia	12.0
Colonia	4.0	Colonia	3.0
Colonia	8.0	<i>Total</i>	34.0
Colonia	7.0	Zona 5	
<i>Total</i>	19.0	Colonia	3.0
Zona 3		Colonia	5.0
Colonia	14.0	Colonia	7.0
<i>Total</i>	14.0	<i>Total</i>	15.0
Caudal total requerido			100.0

La distribución de la demanda de agua potable de la población se calcula en función del número de usuarios o conexiones, y se obtiene por colonias y unidades habitacionales, zonas de facturación, planos de lotificación, sectores de la red, etc. La demanda incluye los caudales de consumos de usuarios y fugas.

Ahora bien, en esta ciudad ficticia, las obras de abastecimiento de agua se encuentran ubicadas en sus extremos y los caudales (en porcentaje) suministrados a cada zona de la población están concentrados desigualmente, como se muestra en *Figura 2-60*.

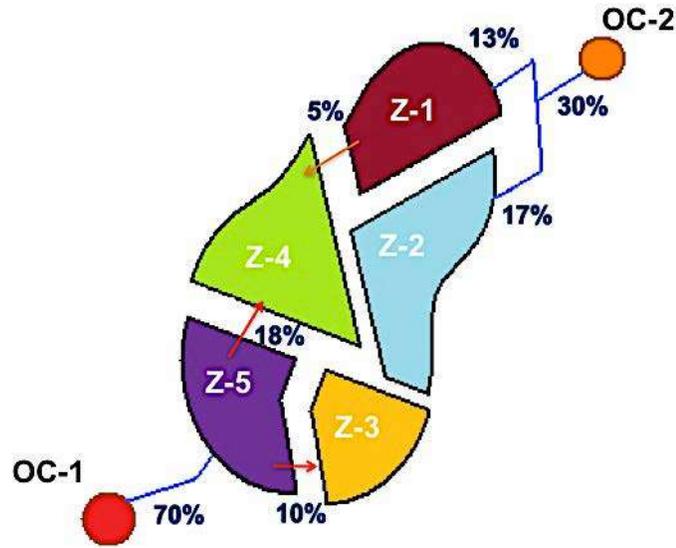


Figura 2-60. Distribución espacial los caudales (en porcentaje) suministrados en una ciudad ficticia; OC= Obra de captación.

La distribución espacial del agua suministrada se obtiene del valor del agua producida en las captaciones, con base en registros históricos o campañas de medición. Los porcentajes señalados en la Figura 2-60 se refieren al valor del caudal suministrado a cada zona, respecto del total producido en el sistema de abastecimiento. Normalmente, estos caudales se obtienen de mediciones en los puntos de entrega y salida de las zonas de influencia.

Comparando los caudales de las Figura 2-59 y Figura 2-60, se observa que en esta ciudad ficticia existen zonas con déficit de agua y otras con superávit, precisamente porque el agua suministrada a cada una de ellas no corresponde con el agua demandada por los usuarios; esto se aprecia mejor en la Figura 2-61 y Cuadro 2-35.

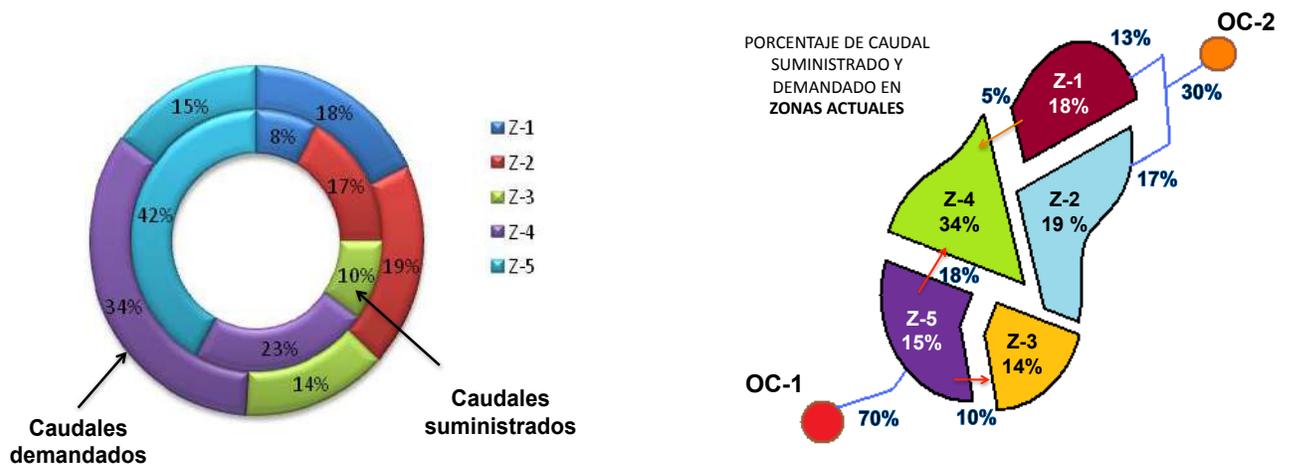


Figura 2-61. Resultado del balance de caudales en la red de agua potable de una ciudad ficticia.

Cuadro 2-35. Resultado del balance de caudales en la red de agua potable de una ciudad ficticia.

Zona	Colonias	Caudal suministrado	Caudal demandado	Diferencia
Z-1	A-B	8.0 %	18.0 %	- 10.0 %
Z-2	C-D-E	17.0 %	19.0 %	- 2.0 %
Z-3	F	10.0 %	14.0 %	- 4.0 %
Z-4	G-H-I-J-K	23.0 %	34.0 %	-11.0 %
Z-5	L-M-N	42.0 %	15.0 %	+ 27.0 %
TOTAL		100.0 %	100.0 %	-

El resultado de caudales suministrados y demandados de esta ciudad ficticia muestra que las zonas Z1, Z2, Z3 y Z4 se encuentran con déficit de caudal, mientras que la zona Z5 tiene un superávit; esto a pesar de que el agua disponible total es suficiente para satisfacer los requerimientos de la población completa, incluidas sus fugas.

Como se puede apreciar, el balance de caudales en cualquier localidad arrojará información importante sobre las condiciones de suministro y demanda de agua, por zonas de influencia o sectores de la red, misma que servirá para realizar la planeación de la red para lograr el equilibrio entre el agua suministrada y el agua requerida por los usuarios de dichos sectores, como se verá más adelante.

En resumen, la aplicación del método de balance de caudales en cualquier sistema de agua potable, se divide en tres partes:

- Definición de áreas de influencia de operación y cálculo de su población .
- Estimación de caudales suministrados y demandados en cada área de influencia hidráulica de la red.
- Comparación entre el suministro y demanda de agua en cada zona de la red.

Con el resultado se confirma si existe suficiente agua en las obras de captación para abastecer a la ciudad y se evalúa cuáles zonas deben incrementar o disminuir su caudal suministrado para alcanzar el equilibrio con su demanda correspondiente. En seguida, se describen las actividades de la aplicación del balance de caudales, tomando como ejemplo el caso de una ciudad real, para que el lector pueda hacer lo propio.

2.5.9.2 Definición de áreas de influencia de operación y cálculo de su población

Las áreas de influencia de la operación actual son la base para la elaboración del balance de caudales y de la planeación de sectores, por eso es necesario que se definan los límites que abastece cada obra de captación, tanque y re-bombeo en la red.

Lo probable es que la mayoría de estas áreas de operación no estén aisladas físicamente, sino que estén definidas por la experiencia de los operadores o establecidas hidráulicamente en forma natural. Es conveniente entonces, que se entreviste a los operadores de la red en campo, para identificar los límites de estas áreas de influencia; conviene realizar recorridos de campo para confirmar estos datos.

Con los resultados de las entrevistas y las consultas técnicas de información, se dibujan las zonas de influencia del servicio de agua sobre un plano del sistema de distribución de agua. Es importante indicar en cada zona de influencia la estructura hidráulica que proporciona su abastecimiento de agua.

En la Figura 2-62 se muestra un ejemplo de cómo se realiza este dibujo de la red con las zonas de influencia del abastecimiento.

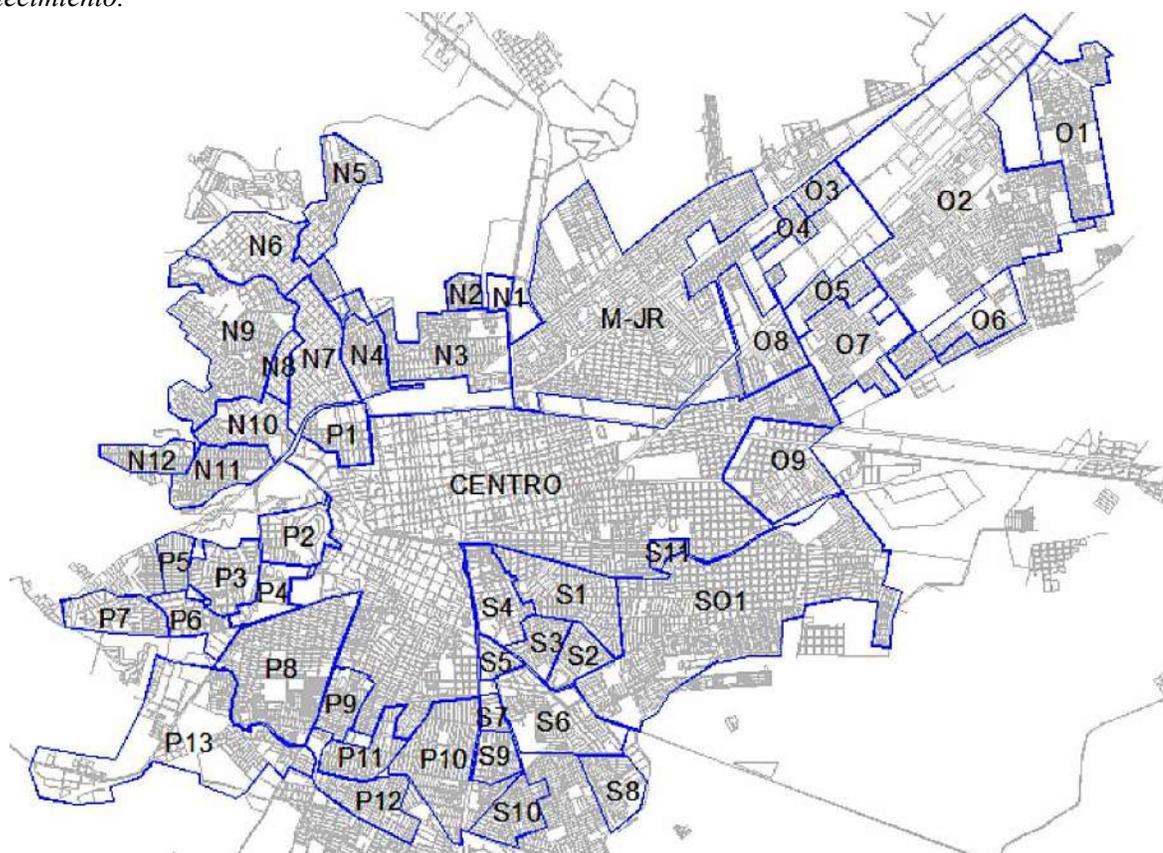


Figura 2-62. Ejemplo de delimitación de zonas de influencia de abastecimiento de agua en una ciudad.

Después de delimitar las zonas de influencia del abastecimiento de agua, se calculan en cada una de ellas la población futura en el horizonte de planeación elegido, utilizando los criterios descritos en el capítulo 2.4 de este libro. Posteriormente, durante el proceso de planeación de sectores de la red, varias de estas zonas de influencia hidráulica se agruparán con la intención de disminuir su número y optimizar la operación del sistema. Por lo tanto, la población de cada sector será la suma de los valores de las zonas de influencia que incluya.

Por ejemplo, en el noroeste de la ciudad del ejemplo se obtuvieron los valores de población mostrados en el Cuadro 2-36.

Cuadro 2-36. Población futura por zonas de influencia en el noroeste de la ciudad del ejemplo.

Zona	Número de habitantes futuros
N1	0
N2	1,918
N3	12,937
N4	5,329
N5	2,169

N6	5,489
N7	9,449
N8	2,297
N9	12,605
N10	2,628
N11	4,907
N12	3,596
Total	63,324

2.5.9.3 Estimación de caudales suministrados y demandados en cada área de influencia hidráulica de la red

Ya que se han calculado las poblaciones futuras de cada zona de influencia de abastecimiento de agua, el siguiente paso es determinar los caudales suministrados en las condiciones de operación actual de la red de distribución y los gastos demandados por los usuarios (estos incluyen el gasto de fugas) en el horizonte de planeación. A continuación, se describe el procedimiento para determinar estos parámetros hidráulicos en cada zona de influencia de la red.

A. Estimación de caudales suministrados a la red por área de influencia

Los caudales suministrados a cada zona de influencia están definidos de acuerdo con las obras de suministro de agua, como son pozos, tanques, re-bombeos, manantiales, potabilizadora, etc. Los valores se pueden obtener de registros históricos si la obra dispone de un medidor fijo, o de mediciones de campo temporales con medidor portátil en caso contrario. Los resultados de la auditoría de fugas y de la evaluación de funcionamiento hidráulico actual de la red serán muy útiles en esta tarea. En cualquiera de los casos, las mediciones de caudal se realizan según los criterios descritos en el inciso 2.5.1 del libro. Con los registros obtenidos, se elabora un croquis y un cuadro con los valores de caudal que se suministran actualmente a cada zona de influencia.

En la Figura 2-63 se muestra la parte noroeste de la ciudad del ejemplo y en el Cuadro 2-37 se presentan los valores de caudales suministrados.

Cuadro 2-37. Caudales suministrados actualmente a zonas de influencia en el noroeste de la ciudad del ejemplo.

Zona	Pozo o tanque	No.	Q suministrado (L/s)
N1	IGNACIO	29	2.5
N2	ACEREROS	83	8.0
N3	16 DE SEPTIEMBRE	68	30.0
	FACTOR I	56	27.0
	FACTOR II	57	12.0
N4	EXPLANADA TEPEYAC	26	68.0
N5	T. LUZ Y ESPERANZA	72	20.0
N6	LOPEZ PORTILLO	24	47.0
N7	MORGA	25	14.0

Zona	Pozo o tanque	No.	Q suministrado (L/s)
N8	JUANA VILLALOBOS II	69 -B	39.0
N9	INTEGRAL PONIENTE	19	49.0
	MIGUEL DE LA MADRID	22	51.0
N10	T. NORPONIENTE	90	37.5
N11	T. LA VIRGEN	79	50.0
N12	T. ANTONIO RAMIREZ	20	49.0
	Total		504.0

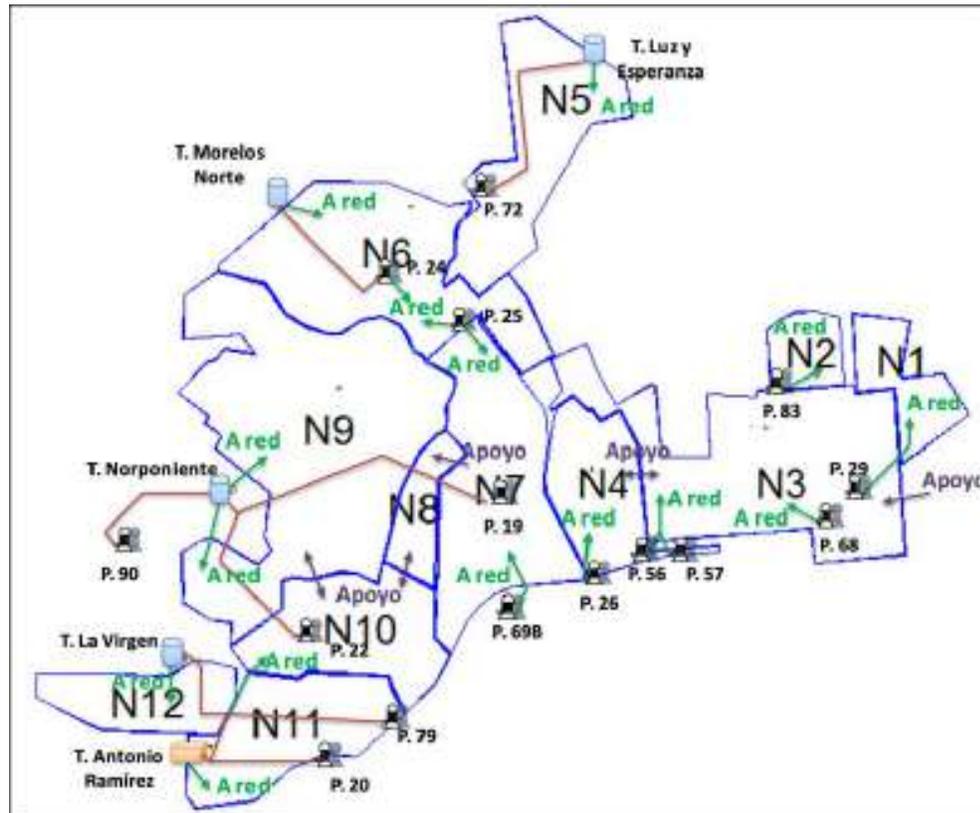


Figura 2-63. Croquis tipo de caudales suministrados actualmente a las distintas zonas de influencia de la parte noroeste red de agua potable del ejemplo.

B. Estimación de caudales demandados por los usuarios en cada área de influencia

Los caudales demandados por los usuarios en cada zona de influencia son aquellos que resultan de multiplicar la dotación de diseño Dot_i (calculada con la ecuación 2.39) del sistema, por el número de habitantes servidos en el horizonte de planeación (ecuación 2.40); ver inciso 2.5.6 del libro.

Ejemplo)

La dotación de diseño en el sistema de abastecimiento de la ciudad del ejemplo resultó de 268 L/hab/día, la cual incluye el consumo y las fugas en la red al 20% del suministro de agua; este porcentaje es el que se pretende alcanzar en el horizonte de planeación con un programa de reducción y control.

Entonces, en el caso de la zona de influencia N2 el número de habitantes futuros es de 1918, por lo tanto el caudal demandado para esta zona es:

$$Q_{\text{demandado-N1}} = \frac{268 \text{ L/hab/día} \cdot 1918 \text{ habitantes}}{86400 \text{ s/día}} = 5.95 \text{ L/s}$$

Si se aplica este cálculo similarmente al resto de las zonas de influencia del noroeste de la ciudad del ejemplo, se obtienen los valores de caudales demandados mostrados en el Cuadro 2-38.

Cuadro 2-38. Valores de caudales demandados por zona de influencia en el noroeste de la ciudad del ejemplo.

Zona	Habitantes	Q demandado (L/s)
N1	0	0.00
N2	1,918	5.95
N3	12,937	40.13
N4	5,329	27.08
N5	2,169	11.02
N6	5,489	16.53
N7	9,449	6.73
N8	2,297	17.03
N9	12,605	29.31
N10	2,628	7.12
N11	4,907	39.10
N12	3,596	18.27
Total	63,324	196.43

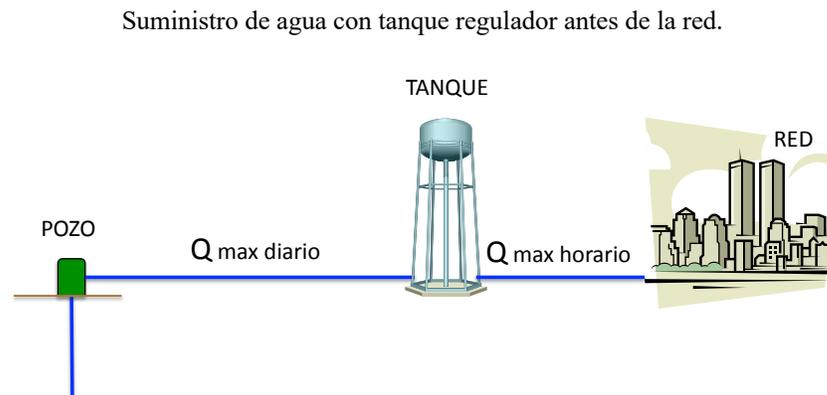
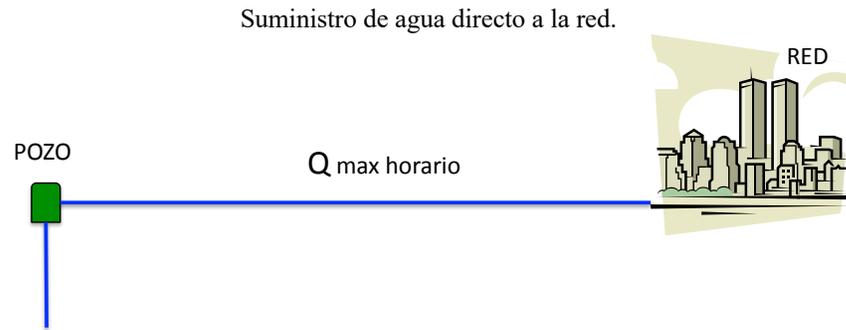
En este caso particular de la zona noroeste de la ciudad del ejemplo, el caudal total de demanda de los usuarios con la dotación de diseño en el horizonte de planeación resultó de 196.43 L/s, que es menor al caudal total suministrado de 504.0 L/s, por lo que se podría concluir que el noroeste de la ciudad no debe tener problemas de abastecimiento. Sin embargo, como se verá más adelante, los caudales pueden estar mal distribuidos, la infraestructura existente desaprovechada y las variaciones diarias y horarias de la demanda ocasionan deficiencias hidráulicas en el servicio de agua potable.

2.5.9.4 Comparación entre el suministro y demanda de agua en cada zona de la red

Luego de calcular los caudales de suministro y demanda por zona de influencia hidráulica, se realiza una comparación para revisar si el agua en la red está bien distribuida. El análisis debe considerar las variaciones diarias y horarias de la demanda de agua y la capacidad de regulación que se disponga en los tanques de cada zona de influencia. Con las diferencias entre los caudales suministrados y demandados, se establecerá si existe un déficit o superávit en la zona de influencia y se sentarán las bases para proponer los cambios de la red y el diseño de los sectores de distribución.

Como se mencionó en el subinciso 2.5.8.1, el caudal máximo a suministrar para cubrir la demanda horaria de los usuarios, $Q_{\text{requerido}}$, se obtiene de multiplicar el caudal medio por los coeficientes de variación diaria y horaria, si el suministro de agua a la zona de influencia se realiza directamente del pozo a la red. Sin embargo, si antes de suministrarla, el agua pasa por un tanque de regulación, solo se multiplica el caudal medio por el coeficiente de variación diaria; esto se debe a que el tanque de

regulación asume las variaciones de la demanda horaria máxima de agua, pero no elimina las variaciones en la demanda diaria (ver Figura 2-64).



Gráfica de variación de caudal suministrado y demanda de agua.



Figura 2-64. Opciones de caudales máximos a suministrar para cubrir la demanda horaria de agua en una red de distribución de agua potable.

Se observa que el valor del caudal suministrado a la población, a través de un tanque regulador, es menor al caudal que se suministra directamente desde un pozo, puesto que este último debe bombear el agua de acuerdo con el patrón de variación de la demanda horaria de agua, mientras que el tanque absorberá esta variación.

Una vez que se hayan calculado los caudales máximos requeridos para todas las zonas, se comparan contra los caudales suministrados disponibles, para identificar si existen zonas de operación con déficit o superávit de caudal.

Ejemplo)

En la ciudad real del ejemplo se eligieron los coeficientes de variación diaria = 1.4 y de variación horaria = 1.55 especificados por CONAGUA, para calcular los caudales máximo diario y horario respectivamente. Así, el gasto máximo que se debe suministrar a la zona de influencia N5 que se alimenta desde un tanque de regulación (Tanque Luz y Esperanza) será:

$$Q_{\text{requerido-N5}} = Q_{\text{demandado}} \times C_{v_d} = 6.73 \text{ L/s} \times 1.4 = 9.42 \text{ L/s}$$

Mientras que el gasto a suministrar a la zona de influencia N2 donde el pozo inyecta agua directamente a la red (pozo Acereros), será igual a:

$$Q_{\text{requerido-N2}} = Q_{\text{demandado}} \times C_{v_d} \times C_{v_h} = 5.95 \text{ L/s} \times 1.4 \times 1.55 = 12.91 \text{ L/s}$$

Cuadro 2-39. Comparación final entre caudales máximos requeridos (demandados) menos caudales suministrados en el noroeste de la ciudad del ejemplo.

Zona	Pozo o tanque	No.	Q pozo (L/s)	Q suministrado (L/s)	Habitantes futuros	Q demandado (L/s)	Tanque de regulación (*)	Q requerido (L/s)	Q requerido menos Q suministrado (L/s)
N1	IGNACIO	29	2.5	2.50	0	0	No	0	+ 2.50
N2	ACEREROS	83	8.0	8.00	1,918	5.95	No	12.91	-4.91
N3	16 DE SEPTIEMBRE	68	30.0	69.00	12,937	40.13	No	87.08	-18.08
	FACTOR I	56	27.0						
	FACTOR II	57	12.0						
N4	EXPLANADA TEPEYAC	26	68.0	68.00	5,329	16.53	No	35.87	+ 32.13
N5	LUZ Y ESPERANZA	72	20.0	20.00	2,169	6.73	Sí	9.42	+ 10.58
N6	LOPEZ PORTILLO	24	47.0	47.00	5,489	17.03	Sí	23.84	+ 23.16
N7	MORGA	25	14.0	53.00	9,449	29.31	No	63.60	-26.06
N8	JUANA VILLALOBOS II	69-B	39.0		2,297	7.12	No	15.46	
N9	NTEGRAL PONIENTE	19	49.0	137.50	12,605	39.10	Sí	54.74	+ 71.35
	MIGUEL DE LA MADRID	22	51.0						
N10	NORPONIENTE	90	37.5						
N11	LA VIRGEN	79	50.0	99.00	4,907	15.22	Sí	21.31	+ 62.07
N12	ANTONIO RAMIREZ	20	49.0		3,596	11.16	Sí	15.62	
			TOTAL	504.00		196.43		351.26	+ 152.74

Nota: () Referenciar con la Figura 2-63.*

De los resultados en el noroeste de la ciudad del ejemplo, se observa que se puede satisfacer el gasto requerido por los usuarios en condiciones de máxima variación diaria u horaria (351.26 L/s), con el gasto suministrado actualmente (504.0 L/s) con un superávit global de +152.74 L/s. No obstante, se nota que es necesaria una redistribución de caudales, puesto que hay zonas de influencia que presentan superávit y otras se encuentran con déficit en el caudal suministrado.

En el proceso de la elaboración del anteproyecto de sectorización se buscará equilibrar los caudales suministrados por las obras de captación y regulación con los caudales de demanda máxima diaria u horaria, según sea el caso. Las posibles soluciones serán reducir o ampliar los límites físicos de las zonas de influencia y/o captar más agua con nuevos pozos, manantiales, obras superficiales, galerías, etc. También, será indispensable revisar si la capacidad instalada de los tanques existentes tiene el volumen suficiente para regular hidráulicamente las variaciones de la demanda horaria en cada zona o sector de influencia. En el siguiente capítulo del libro se tratará este análisis, donde nuevamente se realizarán balances de caudales para verificar si con las acciones de solución propuestas se equilibran los caudales de demanda y suministro de agua en las zonas.

2.6 ANTEPROYECTO DE SECTORIZACIÓN DE LA RED DE AGUA POTABLE

2.6.1 Esquemas de trazo de sectores en redes de agua potable.

El diseño tradicional de redes de distribución de agua potable consiste en formar circuitos hidráulicos con las tuberías primarias y trazar, a partir de ellas, la red secundaria en forma de malla (ver *Figura 2-65*). Los tramos de la red son controlados por válvulas para atender situaciones de emergencia y mantenimiento.

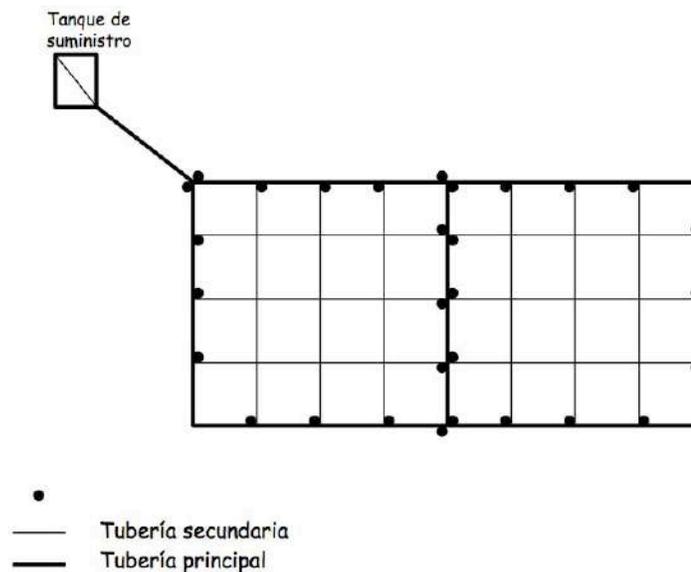


Figura 2-65. Esquema de red con trazo convencional mallado.

En las redes convencionales malladas, los Sectores Hidrométricos son difíciles de conformar, puesto que se requieren realizar muchos cierres de válvulas, dejando sin servicio de agua a otras zonas de la red.

Hoy en día, el diseño y construcción de las redes de distribución de agua potable malladas están siendo reemplazados por el esquema de redes sectorizadas, debido a las facilidades que brinda en el control operacional y a que se logran aumentos sustanciales de las eficiencias volumétrica, hidráulica y energética del sistema de abastecimiento de agua potable, prácticamente utilizando la misma infraestructura.

Dependiendo de la geometría de la red, la topografía del terreno y la infraestructura disponible del sistema de abastecimiento de agua, se identifican dos formas típicas de sectorización de una red de distribución de agua potable: a) Red primaria con bloques de tuberías secundarias y, b) Redes primaria y secundaria integradas; enseguida se describen.

Tipo de Sectorización I: Red primaria con bloques de tuberías secundarias

Este trazado de red consiste en construir circuitos con las tuberías primarias y separar las tuberías secundarias a manera de bloques (*Figura 2-66*). El agua se trasporta a todos los puntos de suministro de los bloques por medio de los circuitos primarios. Normalmente, solo existe una tubería de conexión entre el circuito primario y el bloque secundario, sin embargo, es preferible instalar otro punto de conexión para casos de emergencia.

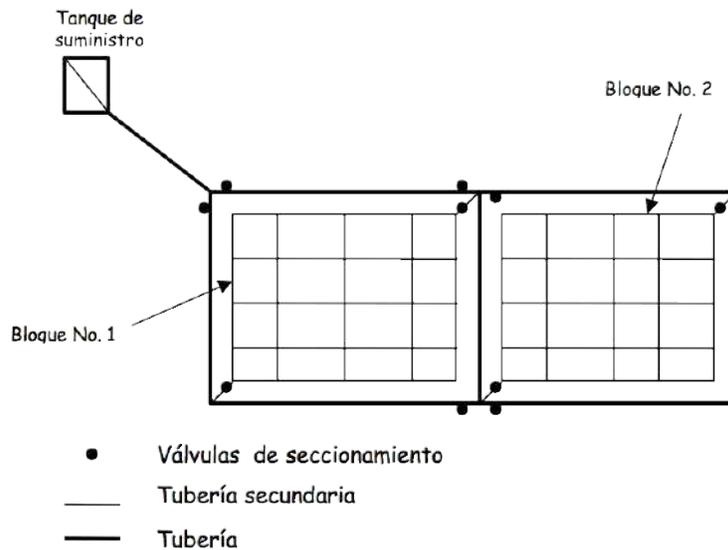


Figura 2-66. Esquema de red con trazo en sectores tipo red primaria y bloques de tuberías secundarias.

Con la sectorización de red primaria con bloques de red secundaria, se conserva la entrega de agua por medio de circuitos, pero la distribución del agua a los usuarios se separa uniendo módulos de tuberías secundarias.

Este tipo de sectorización de circuitos con bloques es muy efectiva en las zonas centrales de las ciudades, donde no existen tanques ni captaciones cercanas a la red.

Ejemplo)

En la Figura 2-67 se muestra parte de la red de una ciudad de México, donde se ha construido este tipo de sectorización en su centro histórico, la cual se abastece de la planta potabilizadora de agua y no cuenta con estructuras de regulación.

Tipo de sectorización II: Redes primaria y secundaria integrada

El segundo tipo de sectorización de redes de agua potable se construye separando totalmente las redes de tuberías primarias y secundarias en forma integrada (*Figura 2-68*). Cada zona de red se alimenta de agua a través de una línea de conducción simple, con trazo ramificado abierto, que proviene de un

pozo, tanque o re-bombeo. En este tipo de sectorización de redes primaria y secundaria integradas cada zona separada conserva su trazo mallado convencional.

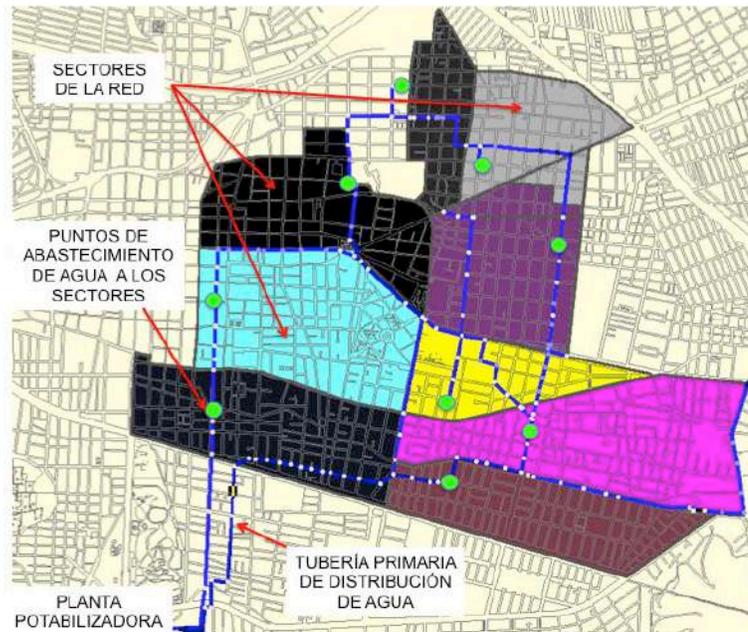


Figura 2-67. Sectorización de la red del centro histórico de una ciudad de México; ejemplo de sectorización de red primaria con bloques de red secundaria.

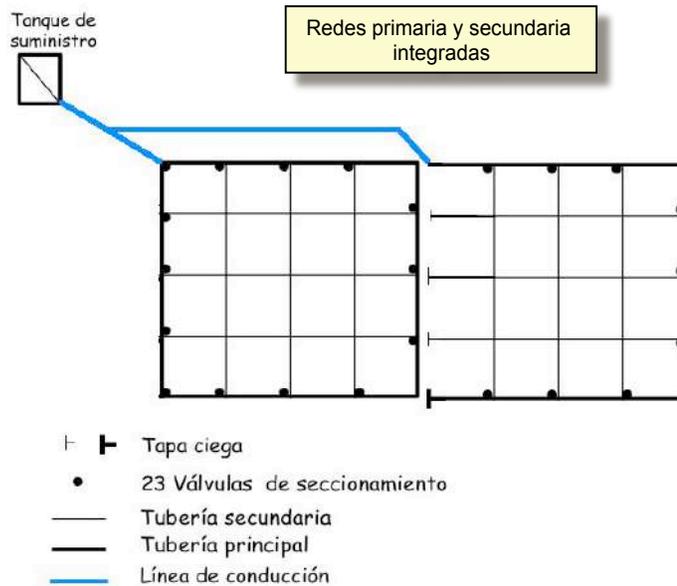


Figura 2-68. Esquema de red con trazo en sectores tipo redes primaria y secundaria integrada.

Comúnmente, aquí los sectores se eligen en función de las capacidades y ubicación de las captaciones, tanques de regulación en la red y líneas de conducción; no hay restricción en cuanto al tamaño de las zonas, solo se busca definir los sectores manteniendo en lo posible las zonas de operación existentes en la red de distribución.

Ejemplo)

En la Figura 2-69 se muestra la sectorización propuesta en una ciudad mexicana. Debido a que el agua de los pozos de abastecimiento ingresa por una línea de conducción, distribuyéndose en tanques y derivaciones a la red, el esquema de sectorización factible fue el esquema de redes primarias y secundarias integradas.

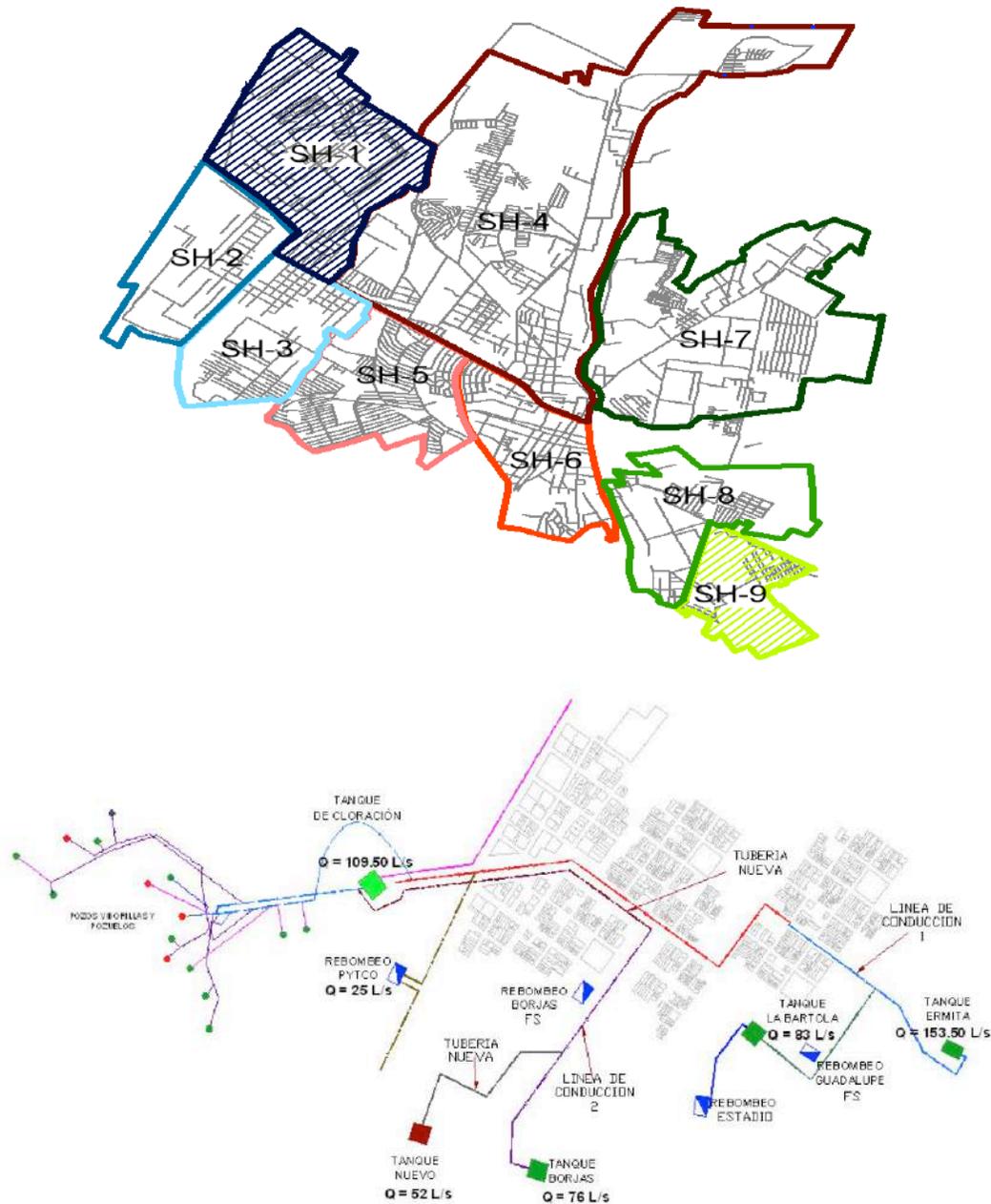


Figura 2-69. Sectorización de la red de una ciudad de México; ejemplo de sectorización de redes primaria y secundaria, integradas.

2.6.2 Elementos clave para elaborar el anteproyecto de sectores en redes de agua potable

Un sistema de agua potable en operación se dice que es hidráulicamente deficiente, cuando:

- a) No tiene un servicio de agua continuo en toda la red.
- b) Está desequilibrado espacial y temporalmente en sus presiones y caudales.
- c) No existen facilidades para las labores de mantenimiento y control de fugas.
- d) No dispone de las capacidades para futuras ampliaciones.
- e) No se aprovechan las oportunidades de ahorro de energía.

El suministro discontinuo en la red provoca el descontento de los usuarios y su resistencia al pago del servicio, disminuye la vida útil de la infraestructura del sistema, genera el deterioro de la calidad del agua transportada por las tuberías; y provoca la incapacidad de los tanques de regulación.

Los principales efectos de desequilibrio de presiones y caudales en la red son uso de depósitos domiciliarios por las bajas presiones en zonas altas de la ciudad y en colonias alejadas de las captaciones, fugas excesivas por las altas presiones en las zonas bajas de la red y en horarios nocturnos, derroche de energía eléctrica en equipos de bombeo para transportar el agua, uso inadecuado de válvulas de seccionamiento y desperdicio de capacidad de tanques para regulación, escasez de agua en zonas alejadas de las captaciones y desperdicio de agua en zonas con abundancia.

Si no existen facilidades en la red para el control de fugas y el mantenimiento, entonces se pierde mucha agua por los vaciados de zonas tan grandes de la red que se aíslan y se usa mucho tiempo al hacer múltiples movimientos de válvulas; hay poco reflejo de las fugas reparadas en la recuperación de caudales; se deja sin agua a grandes zonas para reparar un tramo de tubería.

Si se hacen ampliaciones en la red cuando no existe la capacidad en la infraestructura existente, entonces al conectar nuevos fraccionamientos a la red se deteriora el servicio de agua a usuarios de las colonias que ya tenían un buen servicio; las tuberías actuales transportan más agua y, por lo tanto, hay más pérdida de carga hidráulica; las presiones de la red antigua disminuyen y se provoca que el agua no suba al segundo piso de las casas; las ampliaciones no pueden planificarse y entonces se hacen ampliaciones sobre ampliaciones, provocando movimientos de válvulas para que el agua llegue a todos los puntos alejados de la red.

Si la red no ofrece oportunidades de ahorro de agua y energía, entonces los equipos de bombeo tienen una vida útil menor y se desgastan provocando consumos excesivos de energía eléctrica; el agua de las fugas reparadas migra hacia otras zonas de la red, haciendo inútil cualquier esfuerzo de eficiencia: los costos de operación derivados del derroche de agua y energía obstaculizan la rentabilidad de las inversiones en nueva infraestructura.

Afortunadamente, una red con sectores físicamente aislados incrementa notablemente la eficiencia hidráulica del sistema de agua potable y, si se realiza adecuadamente se pueden evitar todas las deficiencias anteriores.

Fundamentalmente, en la elaboración del anteproyecto de sectorización de una red de agua potable se deben contemplar cuatro elementos necesarios, a saber:

- a) Cada sector debe estar completamente aislado del resto de los otros sectores.
- b) Cada sector debe contar con el suministro de agua directamente de una captación o de una línea primaria de distribución; la tubería de suministro de agua de un sector no debe ser una tubería de salida de otro sector.
- c) Cada sector debe cumplir con las especificaciones de velocidad y presión en todas sus tuberías y nodos, respectivamente.

d) Cada sector debe garantizar todo el tiempo la distribución de los volúmenes de agua requeridos por los usuarios. El suministro discontinuo dentro del sector debe ser admitido solamente cuando no exista agua suficiente en las fuentes de abastecimiento y las fugas hayan sido reducidas a niveles mínimos.

La falta de alguno estos componentes clave en el anteproyecto de sectorización de redes de distribución de agua potable, repercutirá en un esquema ineficiente y provocará errores operacionales y excesivo monitoreo de parámetros hidráulicos.

Además de los elementos anteriores, existen otros componentes importantes que se consideran en el desarrollo de un anteproyecto de sectorización de redes de abastecimiento de agua potable, que tienen que ver con la operación, monitoreo de datos y comercialización del servicio. En el aspecto operacional de los sectores, es importante que cada sector no interfiera con la operación de los otros sectores, cuando se somete a reparación o mantenimiento. En cuanto al monitoreo de datos de los sectores, la tubería por donde se suministra el agua debe disponer los espacios suficientes para instalar un medidor de flujo, fijo o portátil. Por último, conviene modificar la relación de cuentas de los usuarios y toda la información de la facturación del sistema comercial para que corresponda geográficamente y en forma exacta con cada sector; la coincidencia de la zonificación de contratos de usuarios del área comercial con los sectores facilita enormemente las labores de evaluación y monitoreo continuo de los sectores.

Básicamente, el desarrollo del anteproyecto de sectores consiste en delimitar físicamente las nuevas áreas de distribución de agua a la red, modificando la geometría de las zonas de influencia hidráulica actual y cambiando el destino del agua proveniente de las captaciones y tanques reguladores y de rebombeo, hasta que se equilibren los gastos suministrados con las demandas de los usuarios respectivos. Por lo tanto, el anteproyecto solo incluye la evaluación del funcionamiento hidráulico actual, la proyección de población, los balances de caudales y el diagrama unifilar del esquema de sectores con sus gastos de proyecto. El análisis hidráulico de tuberías, la selección de estaciones de aforo, el dibujo de planos y cálculo de volumen de obra, no son parte del anteproyecto, sino que conformarán el diseño o ingeniería de detalle final.

La experiencia demuestra que la determinación del esquema de sectores no siempre resulta fácil, pues se deben combinar muchos elementos particulares de cada sistema urbano, como la topografía, la ubicación y capacidad de la infraestructura existente, los caudales futuros, costos, la disponibilidad de fuentes de agua, la operación actual, entre otros.

En la ciudad ficticia, presentada en el *subinciso 2.5.9.1* del libro, para que se equilibren los caudales de suministro y demanda de agua se deben realizar cambios importantes en dos zonas de influencia originales, de la forma siguiente (*Figura 2-70*):

- Primero, hay que reducir los límites de la zona Z-1, para que disminuya el caudal demandado del 18% al 11%, e incrementar la diferencia de 7% a la zona Z-4.
- Segundo, es necesario que el agua de captación OC-2 se redistribuya, reduciendo el agua en Z-1 y transfiriendo más agua hacia Z-2.
- Tercero, se debe redistribuir también el agua de la captación OC-1, incrementando el caudal en Z-4 y Z-3.

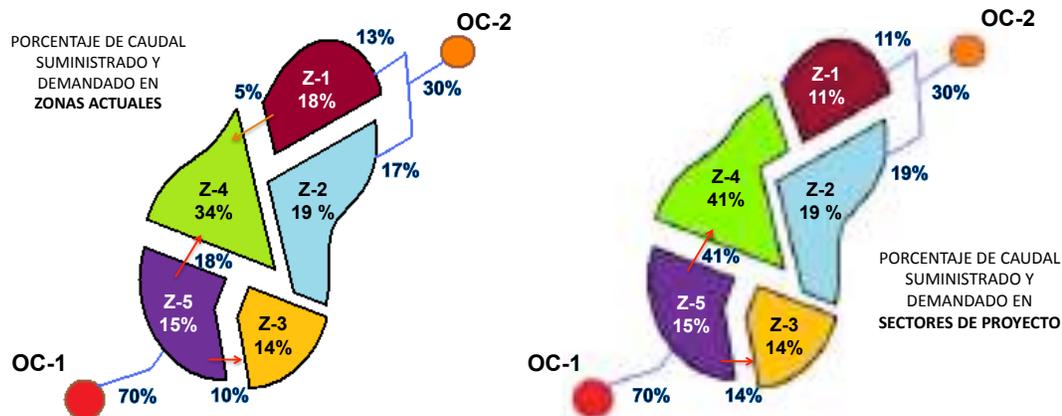


Figura 2-70. Conformación de los sectores de proyecto en la ciudad ficticia del ejemplo, para equilibrar caudales de suministro y demanda.

Estos cambios en las zonas de influencia del ejemplo en la ciudad ficticia dan origen al anteproyecto de sectores. Los balances de caudales correspondientes se muestran en el Cuadro 2-40, donde se comprueba que el sistema ha quedado equilibrado en el suministro y demanda de agua.

Cuadro 2-40. Resultado del balance de caudales actual y del esquema de sectores de proyecto en la ciudad ficticia del ejemplo.

Balance de caudales actual (zonas de influencia actuales)

Zona	Colonias	Caudal suministrado	Caudal demandado	Diferencia
Z-1	A-B	8.0 %	18.0 %	- 10.0 %
Z-2	C-D-E	17.0 %	19.0 %	- 2.0 %
Z-3	F	10.0 %	14.0 %	- 4.0 %
Z-4	G-H-I-J-K	23.0 %	34.0 %	-11.0 %
Z-5	L-M-N	42.0 %	15.0 %	+ 27.0
TOTAL		100.0 %	100.0 %	

Balance de caudales de proyecto (esquema de sectores propuesto)

Zona	Colonias	Caudal suministrado	Caudal demandado	Diferencia
Z-1	A	11.0 %	11.0 %	0 %
Z-2	C-D-E	19.0 %	19.0 %	0 %
Z-3	F	14.0 %	14.0 %	0 %
Z-4	B-G-H-I-J-K	41.0 %	41.0 %	0 %
Z-5	L-M-N	15.0 %	15.0 %	0 %
TOTAL		100.0 %	100.0 %	

Por supuesto que puede haber otras soluciones pero, como en las ciudades reales, eso dependerá mucho del criterio del proyectista, de las condiciones del sistema de abastecimiento de agua potable y de las necesidades de la empresa de agua.

2.6.3 Desarrollo del anteproyecto de sectores en la red de agua potable

En esta sección se indicará cómo realizar el anteproyecto de sectores de la red de distribución de agua potable de una ciudad real. El procedimiento general consiste en efectuar varios análisis en el siguiente orden:

1.- Evaluación del funcionamiento hidráulico actual del sistema de agua potable, que incluye la elaboración del inventario de infraestructura, la revisión y actualización de los planos, el análisis de la operación y mantenimiento, y la selección de las zonas de influencia hidráulica en la red de distribución.

2.- Estimación de la población actual de la localidad y su proyección al horizonte de planeación y diseño, con su distribución espacial.

3.- Análisis entre la oferta y demanda de agua del sistema, que se integra con la determinación de volúmenes suministrados y consumidos, la aplicación de la auditoría de fugas, el cálculo de consumos unitarios, dotaciones y gastos de diseño; también incluye el análisis global para equilibrar la oferta y demanda de agua y el balance de caudales con las condiciones existentes de funcionamiento hidráulico de las obras de captación.

4.- Configuración del esquema de sectores de proyecto, que involucra la delimitación de los nuevos sectores, su revisión hidráulica con el método del balance de caudales, el análisis de la capacidad de tanques de regulación y el dibujo del plano del anteproyecto.

Los análisis 1, 2 y 3 se llevan a cabo como se describe en los capítulos 2.2 a 2.5 del libro. Para el desarrollo del punto 4, se procede como sigue:

PASO 1

Para elaborar el plan de sectores de proyecto, primero se aplica el balance de caudales con la dotación de diseño y las condiciones de suministro actual de agua en las zonas de influencia hidráulica existentes, tal como se describió en el *inciso 2.5.9*. Con el resultado se identifica si en el sistema hay zonas de influencia de operación actual con déficit de caudal, cuyo suministro de agua no satisface las necesidades de los usuarios esperados en el horizonte de planeación.

PASO 2

Si sucede que el sistema de agua potable que se está proyectando está desequilibrado hidráulicamente en la distribución del agua, aún con la estrategia de la reducción de fugas, entonces se tendrán tres opciones de actuación en la planeación del sistema de distribución, o la combinación de ellas:

- **Opción 1.** Aislar físicamente las zonas de influencia y cambiar los gastos que actualmente se suministran a ellas, haciendo algunas adecuaciones a la infraestructura existente, tales como: construir nuevas interconexiones de tuberías, desconectar y/o sustituir tramos existentes de conducciones, cerrar válvulas, rehabilitar tanques de regulación, etc.

- **Opción 2.** Modificar los límites de las zonas de influencia de la operación actual, para conformar nuevos sectores aislados y equilibrados hidráulicamente; esto implica realizar cortes o reconexiones de tuberías y/o cerrar válvulas.

- **Opción 3.** Ampliar las capacidades hidráulicas de las captaciones y rebombeos, y construir nuevas estructuras reguladoras.

Lo más recomendable y conveniente es modificar al mínimo la infraestructura existente y evitar al máximo el aumento de las extracciones de agua. También, resulta muy viable reincorporar tanques de regulación fuera de servicio, o bien, optimizar su funcionamiento actual. La ampliación de las captaciones y construcción de nuevas estructuras reguladoras se realizará solo en caso de que se agoten las opciones 1 y 2.

La ingeniería para conformar los límites de los nuevos sectores es complicada, puesto que hay que combinar muchos factores físicos, hidráulicos, sociales, topográficos, económicos y urbanos que se presentan en la localidad. Hoy en día se cuenta con algunos modelos de simulación que utilizan algoritmos de optimización matemática e hidráulica para definir el esquema de sectores en el sistema de distribución (*Ref. 2.7, 2.8 y 2.9*); sin embargo, su uso en la práctica es todavía limitado, dado que adicionalmente a las condiciones hidráulicas persisten los otros factores mencionados, que en la mayoría de las ocasiones resultan determinantes en la conformación de sectores en la red. En el apéndice del libro se presentan algunos de estos algoritmos y modelos matemáticos de sectorización de redes. Por lo tanto, el esquema final de sectores propuesto en el anteproyecto dependerá en gran medida de la experiencia del diseñador y de los factores exclusivos de la localidad.

Para tener mayor factibilidad en la construcción y operación del esquema de sectores propuesto, se recomienda utilizar los criterios siguientes para el trazo:

- Que las colonias no queden divididas.
- Que se visualice a priori que la carga hidráulica disponible en el tanque, pozo, galería, presa, etc., alcance para todo el sector.
- Que se reduzcan al mínimo los cortes para aislar el sector.
- Que no se afecten las zonas ya equilibradas hidráulicamente en forma natural.
- Que el sector no divida zonas comerciales, parques públicos, industrias u hoteles importantes.

Si al terminar el plan de sectores se observa que todavía hay algunos con superávit de caudal, se disminuye el caudal suministrado a estos sectores y se proponen nuevas capacidades de las estructuras de captación: En pozos se propone cambiar el equipo de bombeo, en galerías filtrantes controlar el gasto conducido, en potabilizadoras disminuir la producción de agua, etc.; incluso, si se considera necesario, se pueden poner pozos fuera de servicio o en reserva. Todo este caudal significa un ahorro de agua y energía para el sistema de abastecimiento de agua potable y dinero para la empresa de agua. Por supuesto, también se puede destinar el caudal sobrante para futuras ampliaciones de la red.

PASO 3

Una vez que se haya definido el plan de sectores, se debe analizar si es posible realizar una sub-sectorización. Esta situación se presenta cuando los sectores son muy grandes y se dispone de estructuras reguladoras, re-bombeos o pozos que suministran el agua a pequeños sistemas de abastecimiento independientes dentro del sector. Es importante recordar que no son distritos hidrométricos, sino

subsectores, cuya finalidad es incrementar la eficiencia hidráulica de la red. La selección y análisis de los distritos hidrométricos se realiza durante la etapa del diseño definitiva o ingeniería de detalle, como se verá en la unidad 3 del libro, con la intención de establecer medidas para facilitar la reducción y control de fugas.

PASO 4

En el caso específico de un proyecto de sectores donde se proponga la utilización de tanques de regulación existentes, es necesario que se verifique con un análisis hidráulico si la capacidad de las estructuras son suficientes para regular las variaciones horarias de la demanda de agua de los usuarios. El cálculo a realizar es igual al que se hace para estudiar los tanques de regulación en un esquema de red tradicional, como se muestra a continuación:

- Se determina una curva de variación de la demanda horaria típica de la zona de estudio. Si no se cuenta con ella, se debe realizar una medición de 24 horas continuas en una zona piloto de la red, tal como se indicó en el capítulo 2.5.8.

En la Figura 2-71 se muestra el ejemplo de una curva típica de variación horaria de la demanda de agua en un sistema de agua potable.

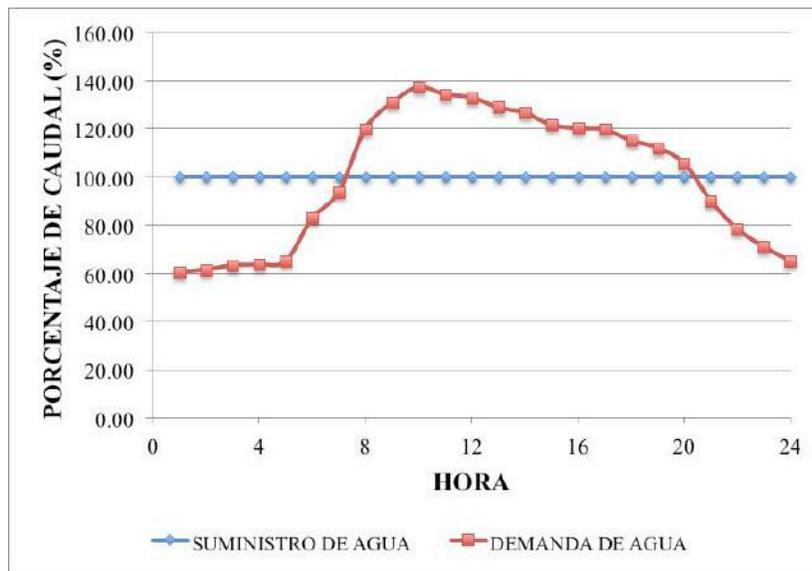


Figura 2-71. Ejemplo de curva típica de variación horaria de la demanda de agua en un sistema de agua potable.

- Ahora se tabulan los datos: en la primera columna se coloca la hora del día; en la siguiente columna se escribe el porcentaje de caudal suministrado, como es de 24 horas continuas el porcentaje será del 100% en cada hora. En la columna que sigue, se anota el valor del porcentaje, obtenido de la curva de variación de la demanda horaria. Luego, en la siguiente columna, se calcula la diferencia entre el suministro y la demanda horaria y, en la siguiente columna, se colocan los valores de las diferencias acumuladas.

En el Cuadro 2-41 se muestran los datos calculados a partir de la curva de demanda horaria de agua de la Figura 2-71 del ejemplo.

Cuadro 2-41. Ejemplo de tabulación de datos de la curva de suministro y demanda de agua, y diferencias acumuladas.

Hora	Suministro de agua (entradas) %	Demanda Horaria de agua en %	Diferencias a cada hora (%)	Diferencias acumuladas
0-1	100.00	60.60	39.40	39.40
1-2	100.00	61.60	38.40	77.80
2-3	100.00	63.30	36.70	114.50
3-4	100.00	63.70	36.30	150.80
4-5	100.00	65.10	34.90	185.70
5-6	100.00	82.80	17.20	202.90
6-7	100.00	93.80	6.20	209.10
7-8	100.00	119.90	-19.90	189.20
8-9	100.00	130.70	-30.70	158.50
9-10	100.00	137.20	-37.20	121.30
10-11	100.00	134.30	-34.30	87.00
11-12	100.00	132.90	-32.90	54.10
12-13	100.00	128.80	-28.80	25.30
13-14	100.00	126.60	-26.60	-1.30
14-15	100.00	121.60	-21.60	-22.90
15-16	100.00	120.10	-20.10	-43.00
16-17	100.00	119.60	-19.60	-62.60
17-18	100.00	115.10	-15.10	-77.70
18-19	100.00	112.10	-12.10	-89.80
19-20	100.00	105.60	-5.60	-95.40
20-21	100.00	90.10	9.90	-85.50
21-22	100.00	78.40	21.60	-63.90
22-23	100.00	71.00	29.00	-34.90
23-24	100.00	65.10	34.90	0.00

• Se elige el valor máximo y mínimo resultante de las diferencias acumuladas, y se aplica la ecuación 2.43, para obtener la capacidad requerida del tanque para regular la demanda máxima horaria con el gasto suministrado.

$$V_T = \left(\frac{|\Delta_{dM}| + |\Delta_{dm}|}{100} \right) \left(\frac{3600}{1000} \right) \cdot Q_{md} \quad (2.43)$$

Donde:

V_T = Volumen requerido del tanque para regular la demanda máxima horaria, en m³.

Δ_{dM} = Diferencia acumulada máxima de suministro menos demanda de agua, en %.

Δ_{dm} = Diferencia acumulada mínima del suministro menos demanda de agua, en %.

Q_{md} = Gasto máximo diario suministrado, en L/s

• El valor calculado con la ecuación 2.43 se compara con la capacidad del tanque existente. Si es menor, entonces no hay problema, el tanque existente es suficiente para regular la demanda horaria de agua.

Si es mayor, entonces se debe recomendar la ampliación del tanque existente o bien disminuir el área del subsector.

Para los datos del Cuadro 2-41 del ejemplo, la diferencia máxima acumulada es de 209.1%, mientras que la mínima es de -95.4%; si el caudal máximo diario tiene un valor de 123 L/s, entonces el volumen mínimo del tanque que se utilice para regular las demandas horarias indicadas será:

$$V_T = \left(\frac{|+209.1| + |-95.4|}{100} \right) \left(\frac{3600}{1000} \right) \cdot 123.5 = 1,354 m^3$$

PASO 5

El plan de sectores se finaliza con la elaboración de la memoria de cálculo y un plano que incluya la red de distribución, los sectores, subsectores con sus valores de población, conexiones y caudales suministrados, además de los dibujos de las obras de captación que abastecen de agua a cada sector, Se recomienda presentar un diagrama unifilar con la solución de sectores del anteproyecto.

Hasta aquí concluye el anteproyecto de sectores de la red de distribución de agua potable, en el cual solamente se ha planteado un esquema de zonas aisladas con una redistribución de los caudales suministrados a cada uno de ellos, con la finalidad de equilibrar su funcionamiento hidráulico. Sin embargo, es necesario verificar que el agua entregada a cada sector se distribuya dentro de él con las velocidades y presiones que especifican los criterios de diseño vigentes. Esta parte del cálculo requiere de la utilización de un modelo de simulación hidráulica de la red y la aplicación del procedimiento que se mostrará en la unidad 3 del libro.

2.6.4 Casos de estudio de anteproyectos de sectores en redes de agua potable

En este inciso se ofrece una muestra de cuatro anteproyectos de sectores que se desarrollaron en ciudades del país, con la finalidad de que el lector aprecie algunas soluciones que se propusieron y disponga de elementos complementarios a los criterios antes expuestos en la aplicación de sus casos propios.

Caso 1. Zona Noroeste de la ciudad real del ejemplo del inciso 2.5.9

En las *Figura 2-72* y *Figura 2-73* se presenta un dibujo con los detalles de las zonas N2 y N3 del noroeste de la ciudad real del ejemplo, cuyos resultados obtenidos muestran que existe déficit de agua suministrada (*Cuadro 2-42*); se incluye también el dibujo y datos de la zona N4, puesto que colinda con estas zonas y tiene un superávit en el caudal suministrado que puede ser susceptible de aprovecharse en las zonas N2 y N1.

Cuadro 2-42. Datos y resultados del balance de caudales en zonas de influencia N2, N3 y N4 de la ciudad real del ejemplo.

Zona	Pozo o tanque	No.	Q pozo (L/s)	Q suministrado (L/s)	Habitantes futuros	Q demandado (L/s)	Tanque de regulación (*)	Q máximo requerido (L/s)	Q requerido menos Q suministrado (L/s)
N2	ACEREROS	3	8.0	8.00	1,918	5.95	No	12.91	-4.91 Déficit
N3	16 DE SEPTIEMBRE	8	30.0	69.00	12,937	40.13	No	87.08	-18.08 Déficit

Zona	Pozo o tanque	No.	Q pozo (L/s)	Q suministrado (L/s)	Habitantes futuros	Q demandado (L/s)	Tanque de regulación (*)	Q máximo requerido (L/s)	Q requerido menos Q suministrado (L/s)
	FACTOR I	6	27.0						
	FACTOR II	7	12.0						
N4	EXPLANADA TEPEYAC	6	68.0	68.00	5,329	16.53	No	35.87	+ 32.13 Superávit
SUMA				145.0	20,184	62.61		135.86	+ 9.14 Superávit

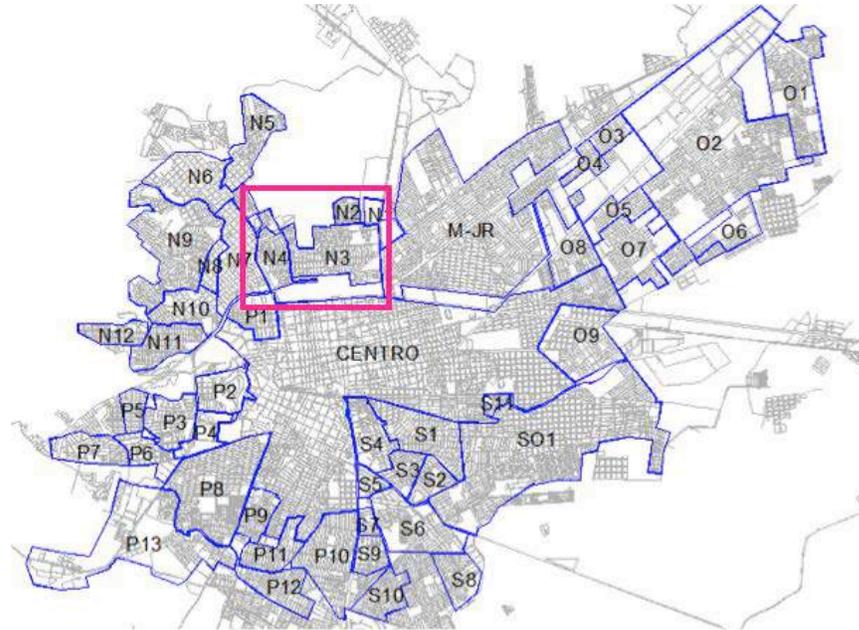


Figura 2-72. Vista general de la ubicación de las zonas N2, N3 y N4 del noroeste de la ciudad real del ejemplo.

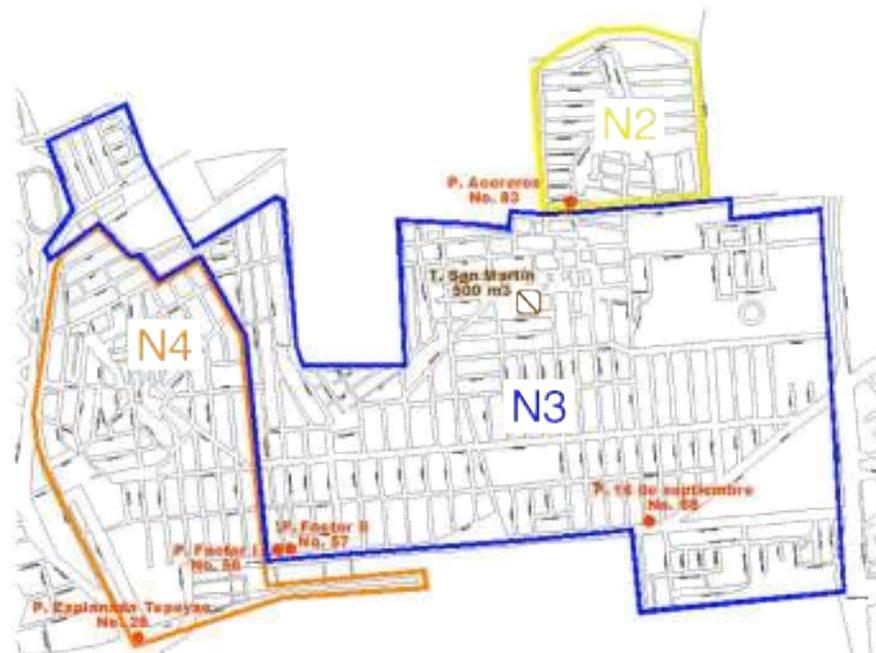


Figura 2-73. Zonas de influencia actual e infraestructura hidráulica disponible en las zonas N2, N3 y N4 del noroeste de la ciudad real del ejemplo.

NOTA: La dotación de diseño es de 268 L/hab/día, con fugas al 20%. En la estimación de los caudales máximos requeridos se utilizaron los coeficientes de variación diaria y horaria de 1.4 y 1.55 respectivamente.

Para equilibrar los caudales suministrados con los demandados en el horizonte de planeación de esta zona noroeste de la ciudad, se aplicaron las opciones 1 y 2, es decir, se cambiaron los gastos que actualmente se suministran y se modificaron los límites de las zonas de influencia para formar los sectores aislados SH1, SH2 y SH3, como se muestra en la Figura 2-74.

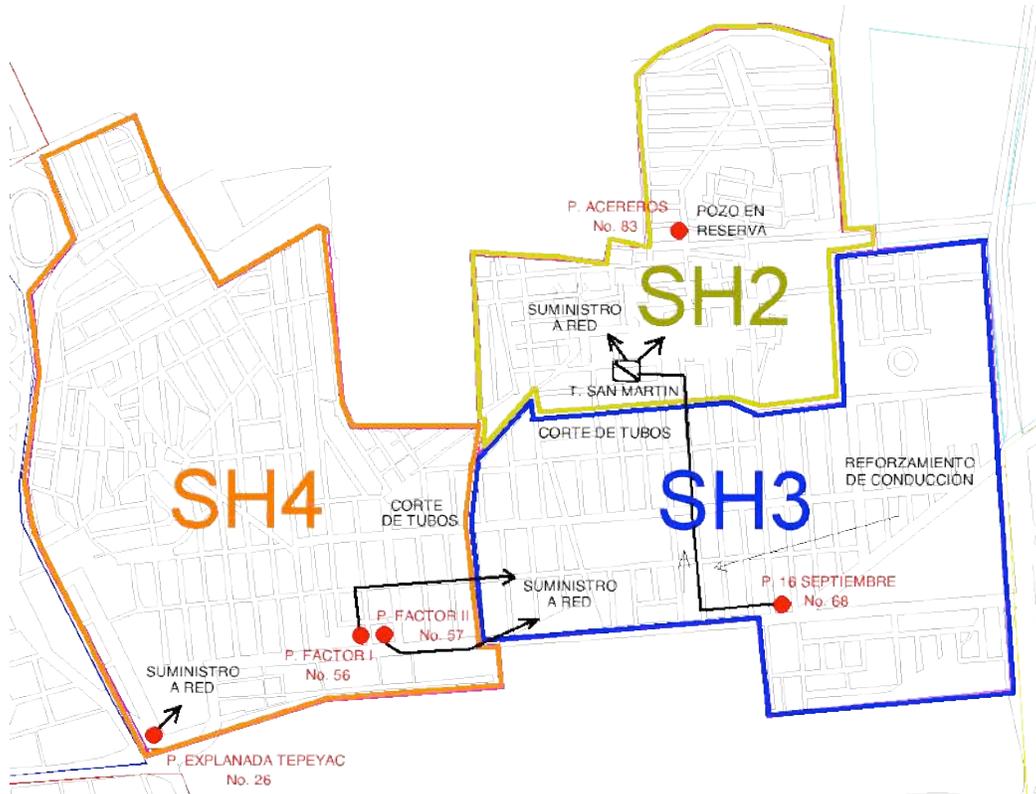


Figura 2-74. Sectores de proyecto SH1, SH2 y SH3 del noroeste de la ciudad real del ejemplo.

Particularmente, los cambios consisten en: a) Reducir los límites de la zona de influencia N3, para formar nuevos sectores hidráulicos aislados; b) Suministrar agua al tanque San Martín con el pozo 16 de septiembre y regular la demanda en el sector SH2; c) Seguir abasteciendo de agua al sector SH3 en forma directa a la red, con los pozos Factor I y II; d) Suministrar agua directamente a la red del sector SH4 con el pozo Explanada Tepeyac; e) Poner en reserva el pozo Acereros; f) Realizar cortes de tuberías, reforzamientos en líneas de conducción y rehabilitación del tanque San Martín. El balance de caudales de la propuesta de sectores del noroeste de la ciudad se presenta en el Cuadro 2-43.

Cuadro 2-43. Datos y resultados del balance de caudales en sectores de proyecto SH2, SH3 y SH4 de la ciudad real del ejemplo.

Sector Hidráulico propuesto	Pozos para suministro	Q Disponible (L/s)	Habitantes	Q demandado (L/s)	Zona regulada	Q Requerido (L/s)	Diferencia Q (L/s)
-----------------------------	-----------------------	--------------------	------------	-------------------	---------------	-------------------	--------------------

SH2	16 DE SEPTIEMBRE	30.0	4,612	14.3	SI	20.0	10.0
SH3	FACTOR I y II	39.0	5,897	18.3	NO	39.7	-0.7
SH4	TEPEYAC	68.0	9,675	30.0	NO	65.1	2.9
SUMA	-	137.0	20,184	62.6	-	124.8	12.2

NOTA: El pozo No. 83, Acereros, con gasto de 8 L/s, se pone fuera de servicio, en reserva.

Como se observa, con la misma infraestructura existente, la propuesta de sectores hidráulicos aislados físicamente y cambiando las obras de suministro de agua, se logra establecer el equilibrio espacial de caudales demandados en el horizonte de planeación del noroeste de la ciudad.

Caso 2. Ciudad con agua en bloque proveniente de varias captaciones externas

En la *Figura 2-75* se presenta el croquis de un sistema de abastecimiento de agua potable con cuatro puntos de suministro a la ciudad, en el cual se han dibujado las áreas de influencia hidráulica de la operación actual del sistema de agua potable.



Figura 2-75. Esquema de abastecimiento de agua potable y zonas de influencia de operación hidráulica en una ciudad.

En esta ciudad se tiene un nivel de fugas del 48.7% del agua suministrada, por lo que el primer análisis fue calcular el balance de caudales considerando que las fugas se reducirán al 20%, de tal manera que la demanda de agua y los gastos máximos requeridos se disminuyeran. Los resultados se muestran en el *Cuadro 2-44*, donde se observa que la dotación de diseño es de 240 L/hab/día y las zonas de influencia de la operación actual están desequilibradas, por lo que fue necesario modificar los límites de las zonas de influencia hidráulica y trazar un esquema de sectores para equilibrarla nuevamente.

Cuadro 2-44. Datos y resultados del balance de caudales en la ciudad real del caso 2, con una reducción de fugas al 20% del caudal suministrado.

Nivel de fugas	20	%
Dotación	240	L/hab/día

CONCEPTO	ZA-2	ZA-3	ZA-1	Suma
Población de proyecto	44,834	60,733	10,071	115,638
Q requerido (L/s)	124.5	168.7	28.0	321.2
Fuentes de suministro	Presa, minas Cabadeñas y Esmeralda	Pozos el Verano	Mina Vesper y la Recompensa	
Q suministrado (L/s)	90.00	240.00	44.00	374.00
Diferencia Q (L/s)	-34.5	71.3	16.0	52.8
	Déficit	Superávit	Superávit	Superávit

NOTA: La dotación con fugas al 20% resultó al aplicar la ecuación 2.39.

Con la finalidad de equilibrar los caudales en la ciudad, se modificaron las áreas de influencia de operación actual (opción 2), disminuyendo el área de la zona ZA-2, que se abastece de agua de la presa y las minas Cabadeñas y Esmeralda, para aumentar las de las zonas ZA-3 y ZA-1, cuyo suministro de agua proviene de los pozos El Verano y Recompensa, respectivamente. En la *Figura 2-76* se muestra la geometría de los sectores que resultan de la modificación de las zonas de influencia actual, con los que se ha conseguido el equilibrio de los caudales suministrados con los requerimientos de agua de la población; este último incluye la implementación de un programa de reducción de fugas al 20% respecto del agua abastecida.

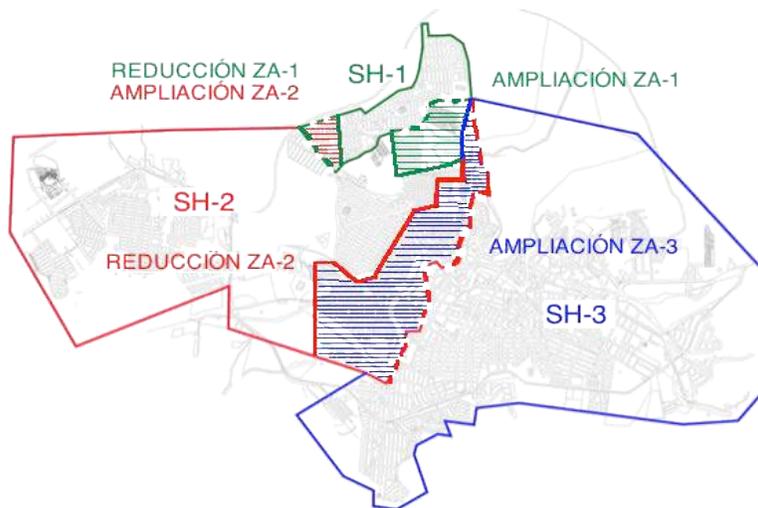


Figura 2-76. Esquema de sectores SH que resultó de las modificaciones a las zonas de influencia de operación hidráulica actual y el equilibrio de caudales, en la ciudad real del caso 2.

En el *Cuadro 2-45* se muestran los resultados del balance de caudales con las modificaciones de las zonas de influencia actual (sectores de proyecto) de la ciudad del caso de estudio 2.

Cuadro 2-45. Datos y resultados del balance de caudales en la ciudad real del caso 2, con los sectores de proyecto y una reducción de fugas al 20% del caudal suministrado.

Nivel de fugas	20	%
Dotación	240	L/hab/día

CONCEPTO	ZA-2	ZA-3	ZA-1	Suma
Población de proyecto original	44,834	60,733	10,071	115,638
Población de proyecto modificada	32,385	72,896	10,356	115,637
Q requerido (L/s)	90.0	202.5	28.7	321.2
Fuente de suministro	Presas, minas Cabadeñas y La Esmeralda	Pozos el Verano	Mina Vesper y la Recompensa	
Q suministrado (L/s)	90.0	240.00	44.00	374.00
Diferencia Q (L/s)	+ 0.0	+ 37.5	+ 15.3	+ 52.8
	Superávit	Superávit	Superávit	Superávit

Se observa como el cambio de la geometría de las zonas de influencia de operación actual, por los sectores de proyecto SH1, SH2 y SH3, ha equilibrado los caudales suministrados con los requeridos.

En esta ciudad se dispone de varios tanques de regulación dentro de los sectores de proyecto, con redes de influencia que forman subsistemas hidráulicos casi independientes, por lo que convino realizar una sub-sectorización de los sectores SH2 y SH3, como se muestra en la *Figura 2-77*.

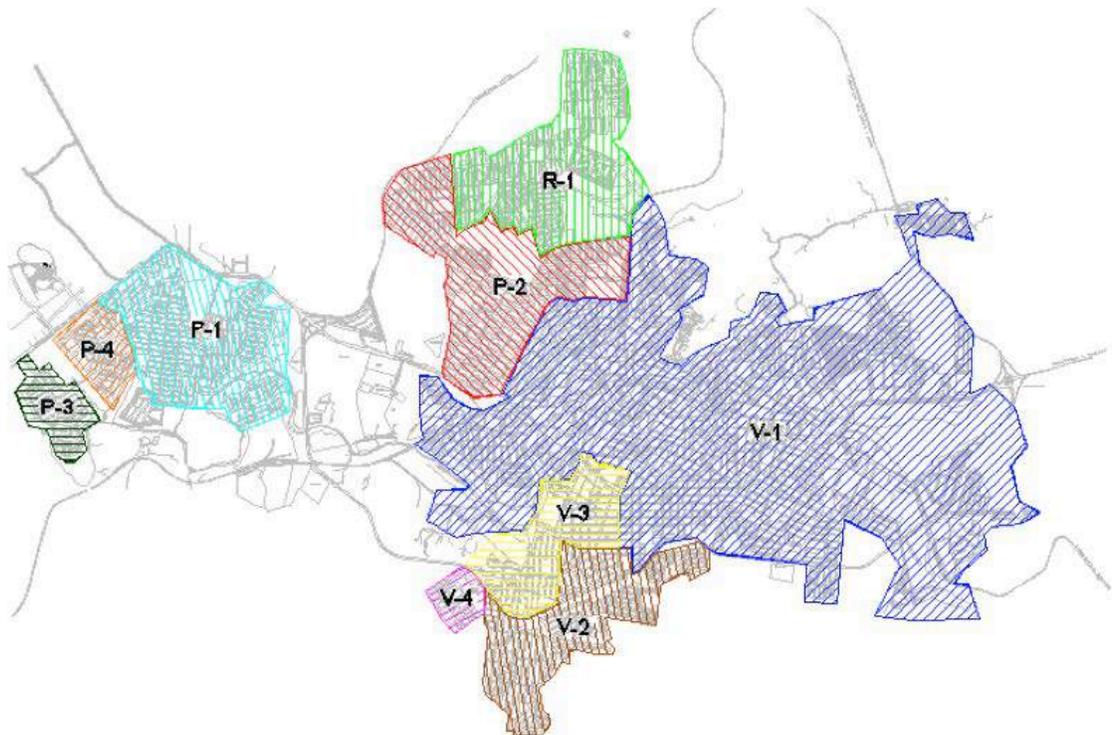


Figura 2-77. Subsectores de proyecto de la ciudad del caso 2.

En este caso el sector SH2 fue dividido en los subsectores P1, P2, P3 y P4, de acuerdo con las áreas de influencia de los tanques de regulación existentes. Análogamente se dividió el sector SH3 en los subsectores V1, V2, V3, V4; el sector SH-1 no tuvo subsectores.

Caso 3. Ciudad con suministro de agua en bloque proveniente de una captación externa

En este tercer caso muestra de anteproyecto, todo el sistema de abastecimiento de agua se realiza con solo una entrega de agua en bloque, desde la parte alta de la ciudad, a través de conducciones primarias operando por gravedad (*Figura 2-78*); se nota que los valores de los caudales están sin control, en función de la capacidad de conducción hidráulica de las líneas primarias de distribución.

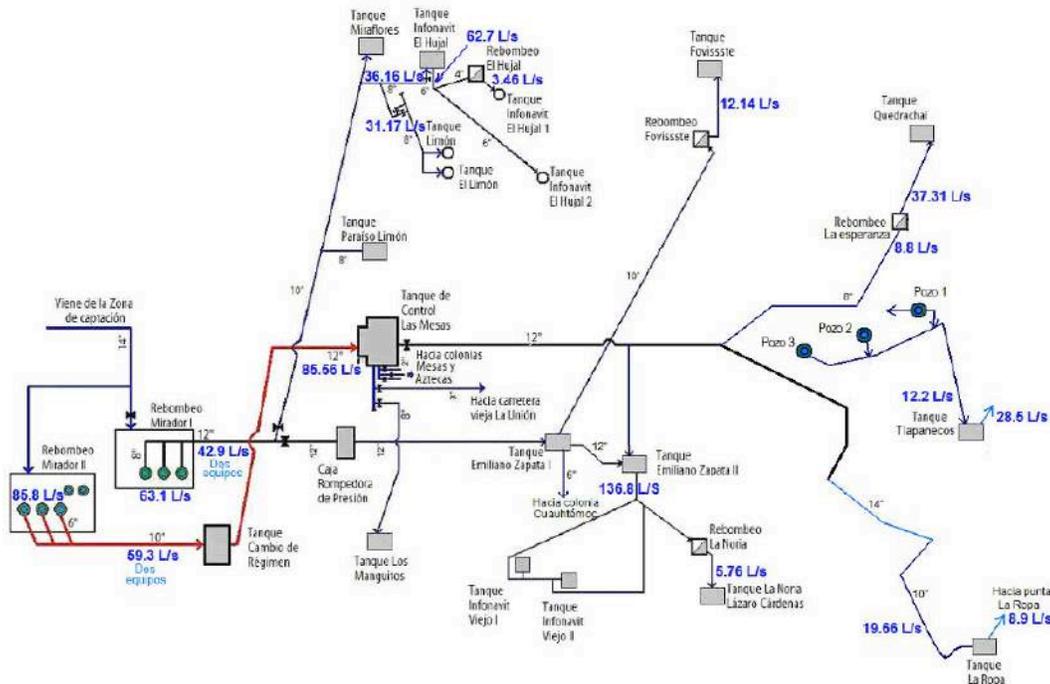


Figura 2-78. Red primaria de distribución de agua actual en la ciudad del caso de estudio 3.

Por lo tanto, los sectores se definieron en función de la topografía y las condiciones de vialidades existentes en la ciudad (opción 1). Se propusieron seis sectores, conformados con las mismas zonas de operación actual de la red de distribución, como se muestra en la *Figura 2-79*, donde se ve que el tanque denominado “Cambio de Régimen” está situado en la parte más alta de la ciudad.

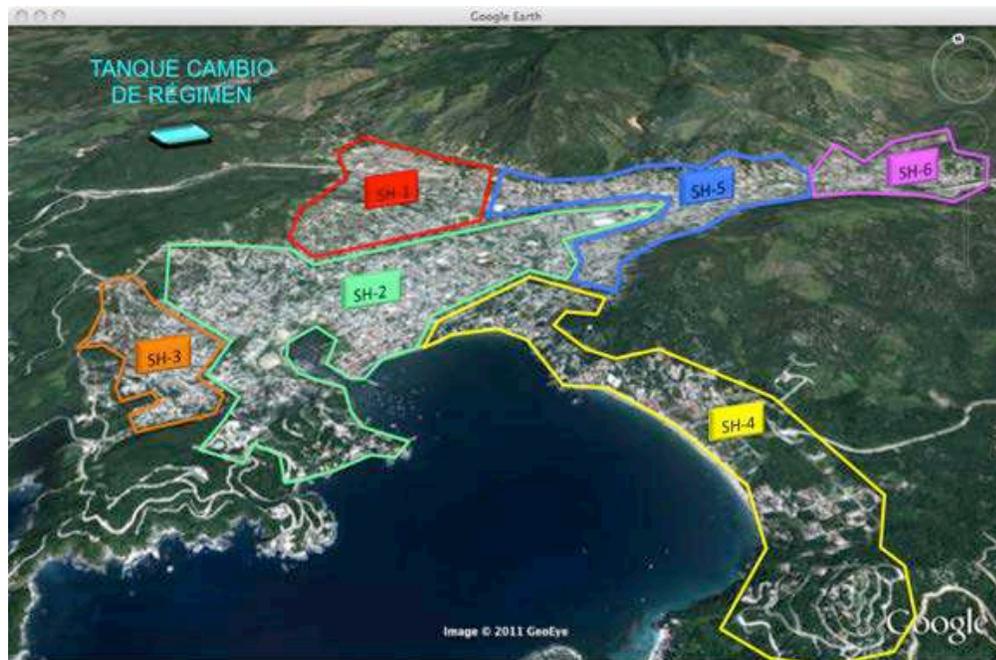


Figura 2-79. Sectores de proyecto para la redistribución de en la ciudad del caso de estudio 3.

Definidos los límites de los sectores, los caudales se direccionaron hacia ellos por medio de las conducciones, a partir del tanque Cambio de Régimen, instalando válvulas automáticas reguladoras de caudal, sacando de operación algunos rebombes y poniendo en operación tanques reguladores, etc., tal como se muestra en la Figura 2-80.

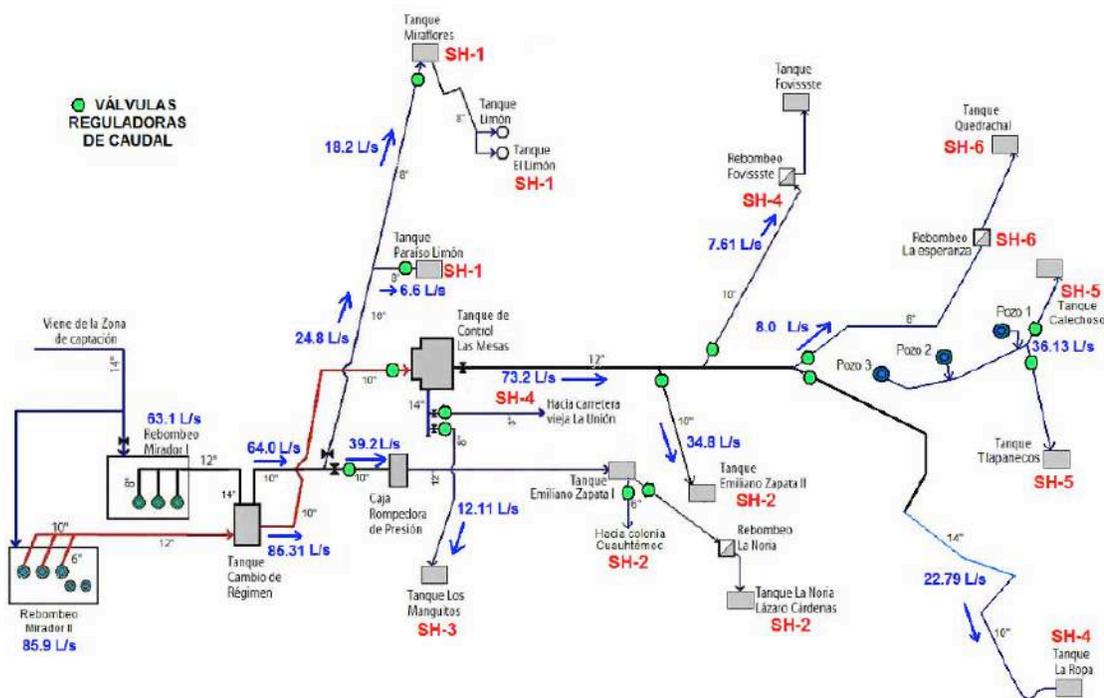


Figura 2-80. Proyecto de conducciones para suministrar agua a los sectores de redistribución de agua potable en la ciudad del caso de estudio 3.

Caso 4. Sistema de abastecimiento con pozos dispersos en toda la ciudad

Otra situación que se suele encontrar comúnmente es el de un sistema de agua potable con pozos profundos distribuidos en toda la ciudad. En este caso, el proyecto de sectores está condicionado por las áreas de influencia de cada pozo y, por lo común, se eligen los sectores en función de dichas zonas de operación. Se pueden tener opciones de interconectar algunos grupos de pozos para abastecer a un sector o dividir el agua de un pozo para suministrar a dos o tres sectores.

En la *Figura 2-81* se muestra la ciudad con sus zonas de influencia de los pozos dispersos en todo el sistema de abastecimiento de agua potable.

Se realizó el balance de caudales y se detectó que el 85% de las zonas presentan déficit entre el caudal suministrado y la demanda, debido principalmente a la combinación de la discontinuidad en la operación de los pozos y el uso excesivo de suministro directo a la red.

Debido a la ubicación los pozos de abastecimiento de agua potable en toda la red existente en esta localidad, el anteproyecto de sectorización consistió en aplicar el esquema de redes primarias y secundarias integradas y amortiguar las variaciones de las demandas con la instalación de tanques nuevos de regulación (opción 1 y 3). En la *Figura 2-82* se presenta el plan de sectores propuesto, donde se observa que cada pozo alimenta de agua a un tanque por medio de tuberías primarias, y desde esta estructura reguladora se suministra el agua cada sector formado por la red secundaria, en función de su zona de influencia hidráulica actual.

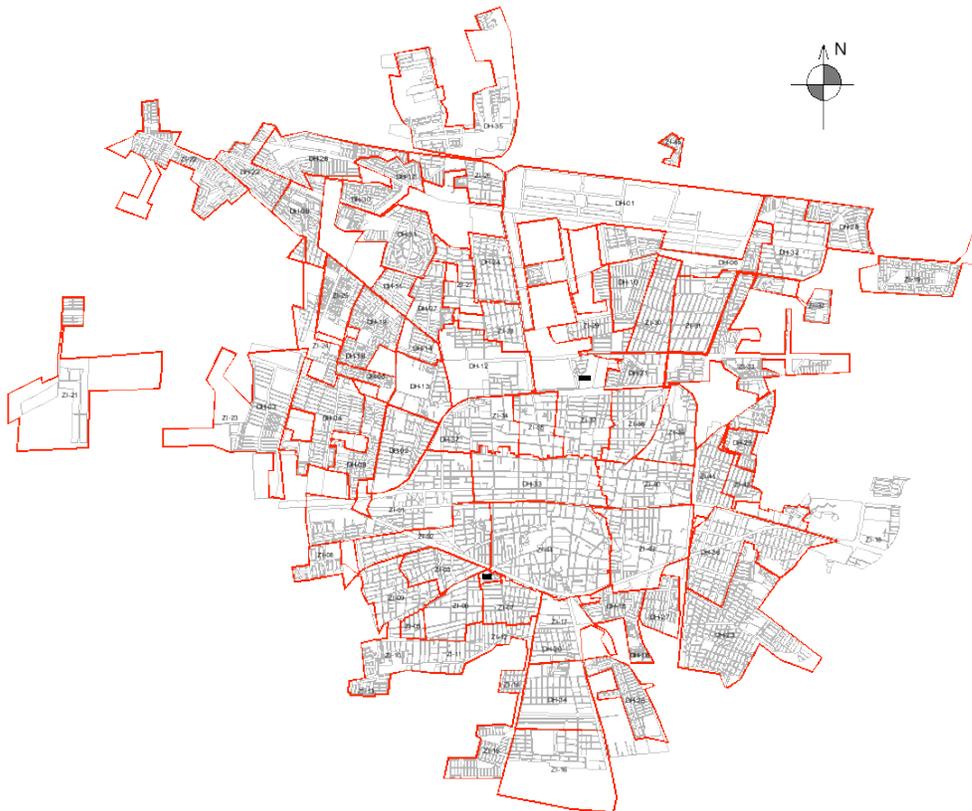


Figura 2-81. Zonas de influencia en una ciudad con pozos de suministro de agua potable dispersos en todo el sistema.

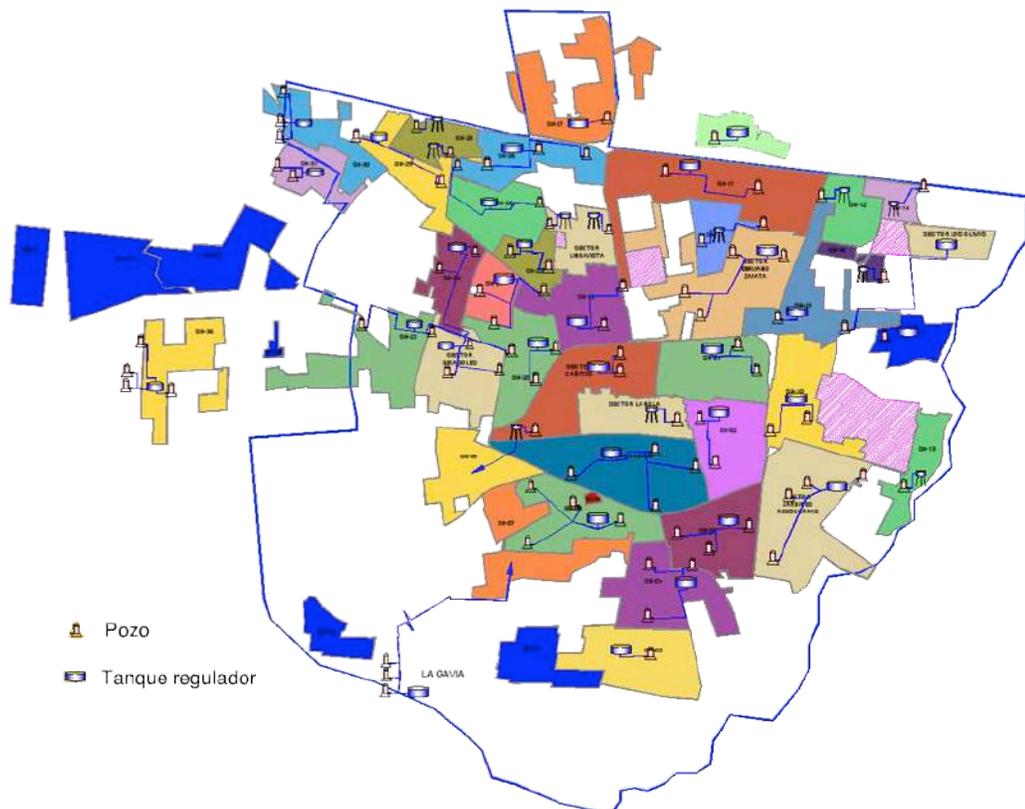


Figura 2-82. Plan de sectores en la red de agua potable de una ciudad con pozos dispersos, caso 4.

Se nota que en esta solución las zonas de operación actual son similares a los sectores de proyecto, pero han sido optimizadas hidráulicamente interconectando pozos, con lo cual el balance de caudales resulta en un sistema equilibrado (ver Figura 2-83).

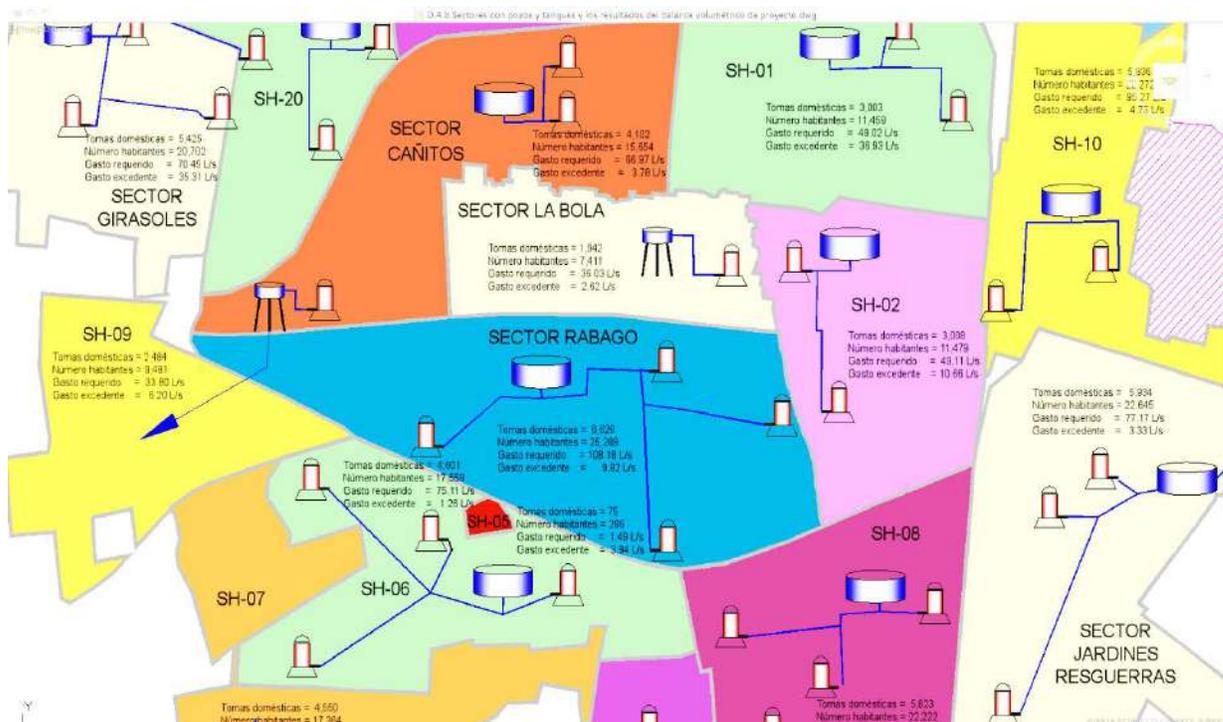


Figura 2-83. Detalle del plan de en la red de agua potable de una ciudad con pozos dispersos, caso 4, donde se nota que se han equilibrado los caudales suministrados con las demandas de agua.

Como se puede constatar, la sectorización de una red de agua potable implica una modificación de la infraestructura original, que ha permanecido a lo largo de los años, con sus ampliaciones y rehabilitaciones correspondientes. En esta situación, si el esquema de sectores se apega lo mejor posible a las condiciones operacionales actuales, es casi un hecho que la implementación práctica del plan de sectorización de la red que se fijó en el anteproyecto será exitosa.

Bibliografía

- [2.1] López A. P., 2006, Abastecimiento de agua potable y disposición y eliminación de excretas, Instituto Politécnico Nacional, Alfaomega Grupo Editor, México.
- [2.2] Tzachtkov V. y Caldiño V., 2007, Obras de toma. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, CONAGUA, México.
- [2.3] Enriquez S., 2001, Manual técnico de bolsillo de medidores de pozos” IMTA, octubre, México.
- [2.4] Fair, Geyer y Okun, 1994, Abastecimiento de agua y remoción de aguas residuales, Volumen 1, Limusa Noriega editores, México.
- [2.5] Espina M. L., 1984, El modelo logístico, editado por DIEP Banco Central de Chile, Serie de Estudios Económicos, No. 23, Santiago de Chile.
- [2.6] Norma NT-011-CNA-2001, Métodos de proyección de población, CONAGUA especificaciones, México.
- [2.7] Norma NT-008-CNA-2001, Determinación de consumos unitarios de agua potable, CONAGUA especificaciones, México.
- [2.8] Norma NT-009-CNA-2001, Calculo de la demanda de agua potable, CONAGUA especificaciones, México.
- [2.9] Dangerfield B.J., 1983, WATER SUPPLY AND SANITATION IN DEVELOPING COUNTRIES, The Institution of Water Engineers and Scientist, London, England.
- [2.10] Kindler J., Rusell C.S., 1984, MODELING WATER DEMANDS, Academic Press (Harcourt Brace Jovannovich, Publishers).
- [2.11] Comisión Nacional del plano hidráulico (SARH), 1981, Plan Nacional Hidráulico, anexo 3 usos de agua.
- [2.12] DDF Reglamento de construcciones para el Distrito Federal, 1993, quinta época No. 9, México, D. F.
- [2.13] Asociación de Entes Reguladores de las Américas – ADERASA (2009). Ejercicio anual de benchmarking – 2008/ Datos 2007. Base de datos e indicadores de desempeño para agua potable y alcantarillado.
- [2.14] Des Raj, 1992, Teoría del Muestreo, Fondo de Cultura Económica, Segunda Edición, México.

Referencias

- [2.1] Ochoa A. et al., 1993, Datos Básicos, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, 1ª Edición, CONAGUA, México. Segunda edición, año 2007, revisada por Tzachtkov V.
- [2.1.bis] IMTA-Conagua 2015, Datos Básicos, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, 3ª Edición, Conagua, México.
- [2.2] Tzachtkov V., 2007, Redes de distribución. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, CONAGUA, México.
- [2.3] Spiegel, 1991, Estadística, Segunda edición, España.
- [2.4] Arreguin Cortes F. y Ochoa Alejo L., 1997, “Evaluation of Water Losses in Distribution Networks” Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Sep-Oct, USA.
- [2.5] Howard G, Bartram J., 2003, Domestic water quantity, service level and health. Geneva, World Health Organization.
- [2.6] Wallace, 1987, Water and Revenue Losses: Unaccounted for Water” AWWA, Research Report.

[2.7] Tzatchkov, V.G.; Alcocer-Yamanaka, V.H.; Bourguett-Ortíz, V. (2006) “Graph theory based algorithms for water distribution network sectorization projects”, VIII Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium (Cincinnati, Ohio, USA).

[2.8] Izquierdo, J.; Herrera, M.; Pérez-García & Ayala-Cabrera D. (2009) “Agent-based division of water distribution systems into District Metered Areas”, ICSOFT 2009: Proceedings of the IV International Congress of Software and Data Technologies (Sofía, Bulgaria), Vol. 2, pp. 83-90.

[2.9] Herrera, M. Izquierdo, J.; Montalvo, I. & Pérez-García, R. (2011) “La regularización del grafo de la red de abastecimiento de agua para la propuesta de su sectorización” Jornadas de Ingeniería del Agua, Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya. UPC.

Proyectos de referencia

[2.1] “Eficiencia Electromecánica, Física y de la Operación Hidráulica de la Red de Agua Potable de Guaymas, Son.” Informe, CEA-Watergy, May. 2008, México.

[2.2] “Sectorización de la red de distribución de Agua Potable, Segunda Etapa” Informe, SAPAC-SHIPSA, Mzo. 2009, México.

[2.3] “Evaluación del error de exactitud de medidores en el sistema municipal de agua potable de Guanajuato”, Informe, PROACTIVA-SHIPSA, Oct. 2010, México.

[2.4] “Sectorización Tercera Etapa Zona Conurbada del Municipio de Toluca, Estado de México” Informe, AyST-SHIPSA, May. 2008, México.

[2.5] “Sectorización y eficiencia de la red agua potable de la ciudad de Celaya, Gto.” Informe SHIPSA-JUMAPA, 2009, México.

[2.6] : “Proyecto Ejecutivo de Sectorización de Redes en la Cabecera Municipal de Acámbaro, Gto.” Informe, SHIPSA-JUMAPA, Jul. 2009, México.

[2.7] “Eficiencia Electromecánica, Física y de la Operación Hidráulica de Santa Catarina, Iztapalapa, D.F.” Informe, SACM-Watergy, 2010, México.

[2.8] Manual de Especificaciones técnicas de JUMAPA, año 2004, Celaya, México

[2.9] “Proyecto de eficiencia electromecánica, física y de la operación hidráulica de la red de agua potable de Durango, Dgo.” Informe, AMD-Watergy, Ago. 2008, México.

[2.10] Proyecto “Construcción de cinco DH en el sector No.2 en la ciudad de Morelia, Mich.” Informe, OOAPAS-PROHIDRO, Nov. 2007, México.

[2.11] “Proyecto de eficiencia electromecánica, física y de la operación hidráulica de la red agua potable de Parral, Chihuahua” Informe JMAS-Watergy Junio de 2007, México.

[2.12] “Proyecto de eficiencia física y de la operación hidráulica de la red de agua potable de Zihuatanejo, Gro.” Informe, CAPAZ-SHIPSA, Jun. 2006, México.

[2.13] “Modelación hidráulica del sistema de agua potable de Cd. Valles, SLP” Informe, DAPA-SHIPSA, Diciembre de 2010, México.

Ligas internet

[2.1] http://en.zenner.com/shared/files/kataloge/spanisch/Pruefstaende_07_es.pdf

[2.2] www.ib-net.org Banco Mundial-IBNET (Red internacional de comparación de empresas de agua y saneamiento).



CAPÍTULO 3

DISEÑO

3.1 CONCEPTOS DE DISEÑO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE

3.1.1 Proceso general de diseño de sistemas de agua potable

La ingeniería de detalle o diseño del sistema de agua potable es la fase en la que quedan definidos todos y cada uno de los subsistemas, componentes o partes que integran el proyecto de mejoramiento, de tal manera que los productos que se desarrollen han de ser suficientes para llevarlo a la práctica. La etapa de diseño está encaminada a afinar el anteproyecto del sistema de abastecimiento de agua y dejarlo documentado listo para realizar la construcción. Para ello, se realiza cálculo técnico, elaboración de planos ejecutivos, cálculo de cantidades de obra y definición del catálogo de conceptos con un costo base.

El cálculo técnico consiste en analizar hidráulicamente la red en su conjunto, para obtener las presiones en sus nodos y los valores de los caudales y velocidades que circulan por cada una de las tuberías. Con base en los resultados se hacen modificaciones al anteproyecto del sistema de abastecimiento de agua potable, hasta asegurar que dichas velocidades y presiones se encuentren dentro de los valores permisibles que se establecen en especificaciones oficiales. En la actualidad, este cálculo se realiza mediante modelos de simulación hidráulica establecidos en un software comercial, debido a que facilitan enormemente el tiempo de análisis y disminuyen las posibilidades de error.

Al final del análisis hidráulico se obtienen las dimensiones de todos los diámetros de las tuberías, la carga hidráulica y caudal de cada equipo de bombeo, los volúmenes de tanques de regulación y rebombes, la ubicación y detalles de calibración de las válvulas de control, la localización de tuberías que deben sustituirse o rehabilitarse, los puntos de unión o desconexión de tramos de tuberías y los datos de velocidades y presiones en la red.

Con estos resultados se procede al diseño particular de los elementos del sistema, tales como: la selección del tipo y clase de tuberías; las especificaciones electromecánicas de los equipos de bombeo, el cálculo estructural de los tanques y rebombes; la selección de válvulas y accesorios; el cálculo de atraques, silletas y cajas de válvulas; etc. Asimismo, se definen todos los detalles constructivos que están asociados con los elementos diseñados de la red de distribución del proyecto.

Una vez que se tienen todos los detalles de los diseños hidráulicos, estructurales y electromecánicos, se procede a dibujarlos en planos de ejecución. Estos planos deben ser realizados de tal forma que puedan ser interpretados por los constructores. Para ello se utiliza una nomenclatura especial y simbologías establecidas. Normalmente, los planos incluyen toda la información técnica de las obras a construir y equipos a instalar.

Paralelamente al dibujo de planos, se calculan las cantidades de obra que implica el diseño del sistema de distribución. Estas cantidades de obra son cuantificadas consultando las especificaciones constructivas, los materiales involucrados y el diseño. En general, las cantidades de obra se clasifican en obras preliminares, civiles, instalaciones hidráulicas e instalaciones electromecánicas y obras complementarias, listándolas por conceptos relacionados con una unidad de medida y el número de unidades; por ejemplo, el concepto de la excavación de zanjas se expresaría en 18.5 de metros cúbicos, la instalación de tubería de tres pulgadas de diámetro en 165.7 metros lineales, etcétera.

Por último, se elabora el catálogo de conceptos junto con los costos base, para que se prevea la asignación presupuestal del concurso de construcción. Los costos se determinan multiplicando costos

unitarios por el número de unidades de cada concepto. El costo base es también útil para analizar la rentabilidad del proyecto en cuestión.

3.1.2 Método de análisis hidráulico en el diseño de la sectorización de la red de agua potable

En el caso particular del diseño ejecutivo de la sectorización de la red de agua potable, el análisis hidráulico se realiza en dos partes: por un lado, se analizan los subsistemas de redes secundarias de los sectores, para confirmar y asegurar los requerimientos de agua fijados en el anteproyecto de sectorización, y por otro, el sistema de red primaria que suministra agua a cada sector, con la finalidad de garantizar su funcionamiento respectivo.

a) Método de análisis hidráulico de la red secundaria de sectores

Como se describió en la unidad dos del libro, los sectores definidos en el anteproyecto recibirán el agua de suministro de la red primaria en uno o varios puntos de la red secundaria de dichos sectores. Aunque el valor de los caudales sea suficiente para satisfacer la demanda de agua en los sectores, puede suceder que la topología y el estado físico de las tuberías de la red secundaria no sea adecuado para transportar el agua a todos los sitios internos del sector, debido a los siguientes factores:

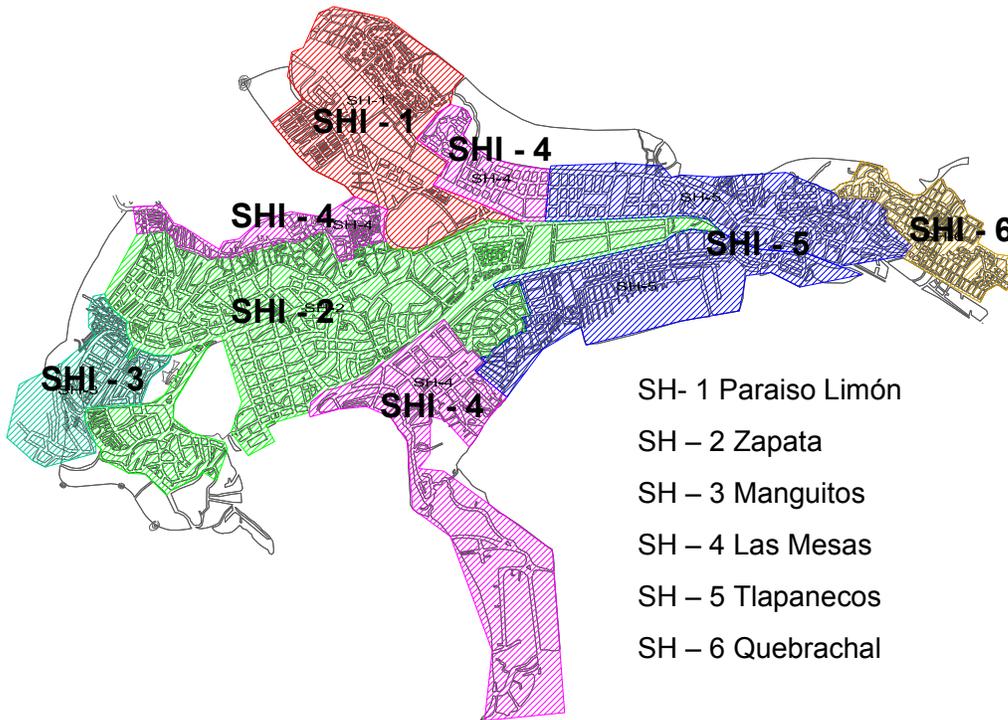
- Diámetros de tuberías con insuficiente capacidad hidráulica.
- Recorridos del agua muy largos.
- Discontinuidades en los tramos de tuberías.
- Reducciones de diámetros grandes a muy pequeños en tuberías.
- Topografía irregular del área.
- Zonas con elevaciones altas.

Asimismo, se pueden tener casos en que todos los sitios de la red secundaria de los sectores dispongan de la cantidad de agua, pero la presión del agua esté por debajo de los valores mínimos de especificaciones vigentes.

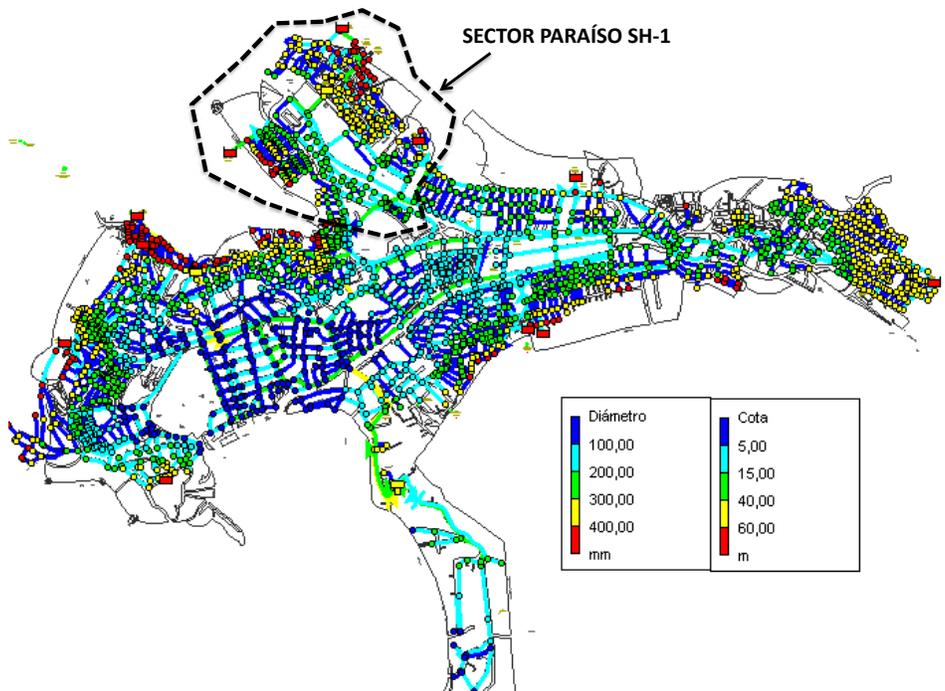
Por estos motivos es necesario realizar un diseño interno de cada sector, mediante el análisis hidráulico de su red secundaria, hasta lograr que se cumplan los requisitos de caudales en las tuberías y presiones en los nodos, según el anteproyecto y las especificaciones de diseño. El primer paso es conformar un modelo de simulación hidráulica de la red secundaria, el cual debe reproducir a todos los tramos y nodos existentes, los caudales de consumo de usuarios, el funcionamiento de los rebombes, tanques, válvulas, etc. Este modelo de red secundaria debe ser verificado y ajustado en su operación con información de recorridos de inspección física de la infraestructura, con datos de mediciones en campo de caudal y presión, cargas en equipos de bombeo y niveles. Una vez que se haya calibrado el modelo, se procede con el análisis hidráulico sector por sector, primero en las condiciones existentes con el sector aislado y luego adecuando los elementos de su red, hasta lograr en el cálculo su buen funcionamiento hidráulico en presiones, velocidades y caudales. Las adecuaciones de diseño consisten en lo siguiente: sustitución de diámetros en tramos clave; reconexión de tuberías; cortes de tubos; cierre de válvulas; instalación de válvulas de control automático, como las reductoras y sostenedoras de presión y las limitadoras de caudal; apagado, prendido o reemplazo de equipos de bombeo; cambio de materiales de tuberías; entre otras. El análisis queda terminado cuando en todos los sectores se cumplen las especificaciones de presión y velocidad en todos los sitios de la red secundaria.

Ejemplo)

En la Figura 3-1 se muestra un ejemplo de modelo hidráulico de la red secundaria, conformado para el diseño de sus sectores. Particularmente, se presentan las adecuaciones que se realizaron durante el diseño del sector Paraíso, con el fin de lograr su buen funcionamiento hidráulico interno; análisis similares se elaboraron en el resto de los sectores hidrométricos.



3.1.a. Sectores hidrométricos propuestos en el anteproyecto de la red del ejemplo.



3.1.b. Modelo general de la red secundaria.



3.1.c. Resultados de presión y caudal con el modelo de la red secundaria existente en el sector SH-1. Se observa que algunas zonas de la red se quedan sin agua y en otras las presiones son muy altas.



3.1.d. Resultados de presión y caudal con el modelo de la red secundaria de diseño en el sector SH-1 Con las adecuaciones en la red (conexión, desconexiones, instalación de válvulas reductoras de presión y tubería nueva), se regulan las presiones en toda la red del sector.

Figura 3-1. Modelo de simulación hidráulica de la red secundaria de sectores del ejemplo y adecuaciones de diseño para su buen funcionamiento hidráulico interno.

Como parte del diseño de los sectores de la red, se realiza adicionalmente el trazo y análisis de distritos hidrométricos, los cuales quedarán conformados dentro de cada sector, para ser utilizados en la gestión del control de fugas.

b) Método de análisis hidráulico de la red primaria en la sectorización

El análisis y diseño hidráulico del sistema de distribución primaria tiene por objetivo determinar las capacidades de sus tuberías, bombes y tanques de regulación, que garanticen los caudales y presiones de suministro de agua en los puntos de entrega de los sectores, fijados previamente en el anteproyecto y confirmados en su diseño. Para lograrlo, primero se conforma un modelo de simulación hidráulica con la esqueletización de la red primaria, colocando nodos de caudal en los puntos de suministro de agua a los sectores. El modelo debe incluir las obras de captación, rebombes, tanques de regulación, válvulas de control, etc. En seguida, se realiza una calibración del modelo en condiciones existentes, utilizando datos de mediciones de caudal a la llegada de tanques y rebombes, y de carga vs caudal en la descarga de pozos y rebombes, hasta que dicho modelo reproduzca el comportamiento de los equipos de bombeo, válvulas, niveles de tanques, cargas hidráulicas de bombeo, presiones en nodos y caudales en las tuberías. Finalmente, con el modelo ajustado se realizan las modificaciones al trazo de la red de acuerdo con los requerimientos del anteproyecto y diseño de sectores y se revisa el funcionamiento hidráulico en su conjunto.

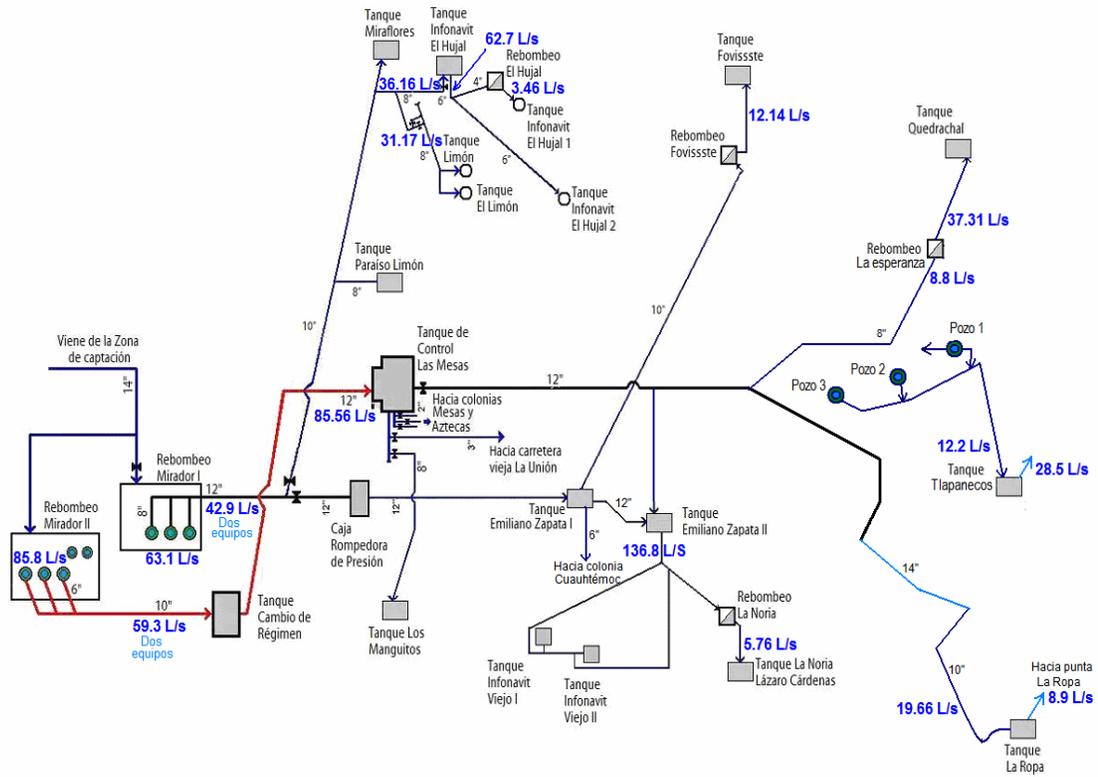
En caso de que en el sistema propuesto no resulten los caudales y presiones previstos en el anteproyecto y diseño, se cambia la operación de los equipos de bombeo y válvulas, si no, entonces se varían los diámetros de tuberías, y si no se consigue el funcionamiento adecuado, se modifica el trazo de las conducciones.

Ejemplo)

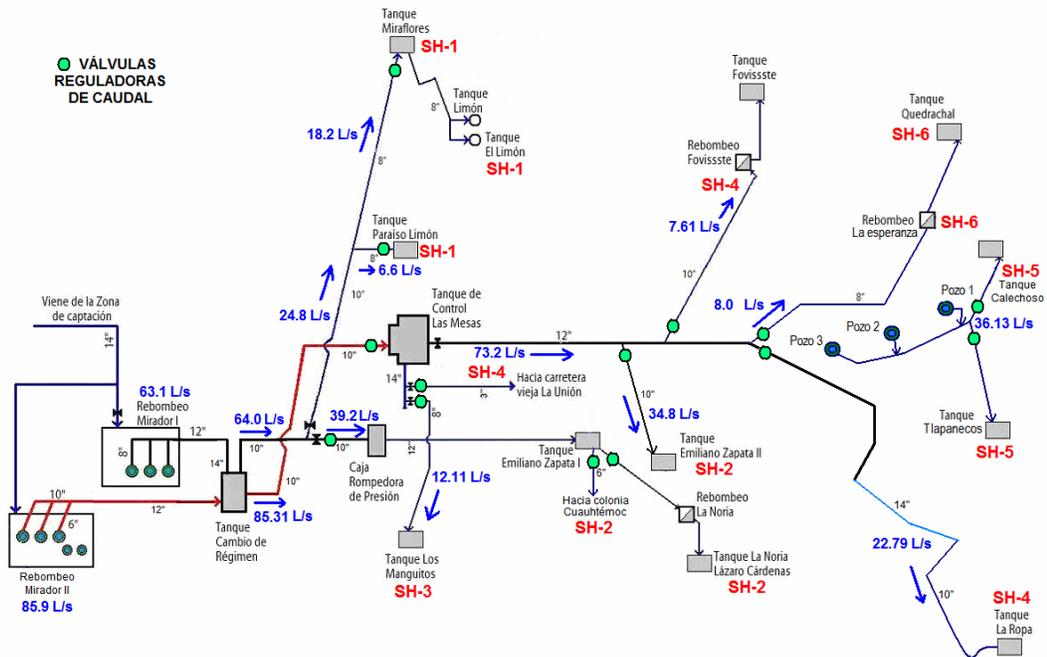
En la Figura 3-2 se muestra el trazo original de la red primaria del sistema de abastecimiento de agua potable del ejemplo anterior, el esquema propuesto para las conducciones de suministro de agua a los sectores y el modelo de simulación hidráulica que se utilizó para realizar el análisis y el diseño ejecutivo.

Cuando se trata de sistemas de abastecimiento con pozos dispersos en la red, no existirá diseño de red primaria. Estas captaciones se analizan y diseñan hidráulicamente junto con el modelo de la red secundaria, independientemente si se trata de suministro directo a red o a un tanque de regulación o rebombeo.

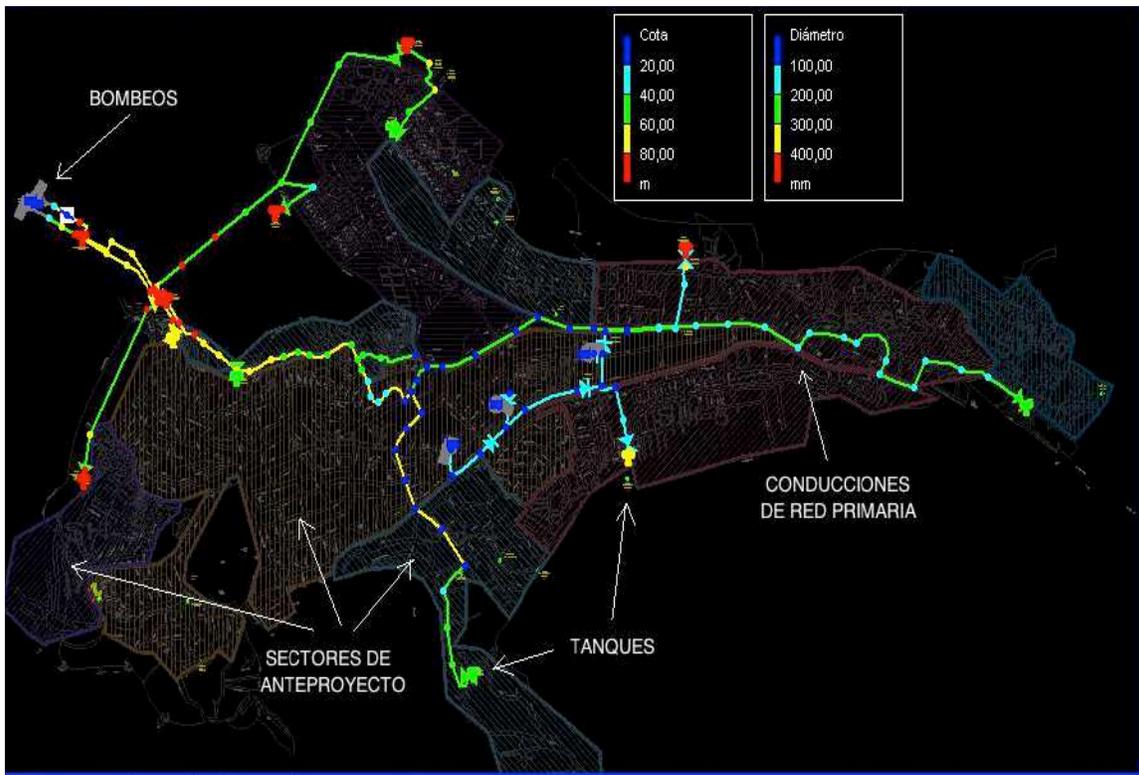
En los siguientes capítulos de esta unidad tres se describen con mayor detalle los elementos y métodos para llevar a cabo el diseño ejecutivo hidráulico de los sectores y distritos hidrométricos, el dibujo de planos, el cálculo de cantidades de obra y la elaboración del catálogo de conceptos respectivo. No se trata el diseño ejecutivo estructural y electromecánico, que por su extensión queda fuera de los alcances del presente libro. Al final de esta unidad se muestra la metodología que se sigue para analizar la rentabilidad de la construcción e implementación del proyecto de sectorización.



3.2.a. Trazo original de la red de distribución primaria del ejemplo.



3.2.b. Diagrama unifilar del anteproyecto de la red primaria para redistribuir caudales a sectores.



3.2.c. Modelo de simulación hidráulica de la red primaria.

Figura 3-2. Ejemplo de la conformación del modelo de simulación de la red primaria, para realizar el análisis hidráulico de diseño.

3.2 DISEÑO HIDRÁULICO DE LA SECTORIZACIÓN DE LA RED

3.2.1 Conformación del modelo de simulación hidráulica de la red

3.2.1.1 Teoría de la modelación de redes de agua potable

Un modelo de simulación de una red de abastecimiento de agua es una representación del funcionamiento hidráulico real del sistema de distribución de agua potable de una ciudad, verificable con mediciones de parámetros físicos.

Las fases de la modelación de sistemas hidráulicos a presión se muestran en *la Figura 3-3*, donde se observa que está basada en los principios básicos de la hidráulica: continuidad, cantidad de movimiento y energía.

El modelo de simulación hidráulica es la base para reproducir el funcionamiento hidráulico de un sistema de distribución de agua en servicio, para diseñar una red nueva y para optimizar la operación hidráulica de cualquier red. En el proyecto de sectorización de la red es necesario aplicar un modelo de simulación hidráulica para la red primaria y otro para la red secundaria, tanto para simular la situación actual, como para analizar el comportamiento hidráulico del esquema de sectorización diseñado. La importancia de contar con estos modelos de simulación de la red primaria y secundaria es tener la herramienta base confiable, que servirá para analizar las diferentes condiciones de operación que se deriven de la propuesta de sectorización del sistema.

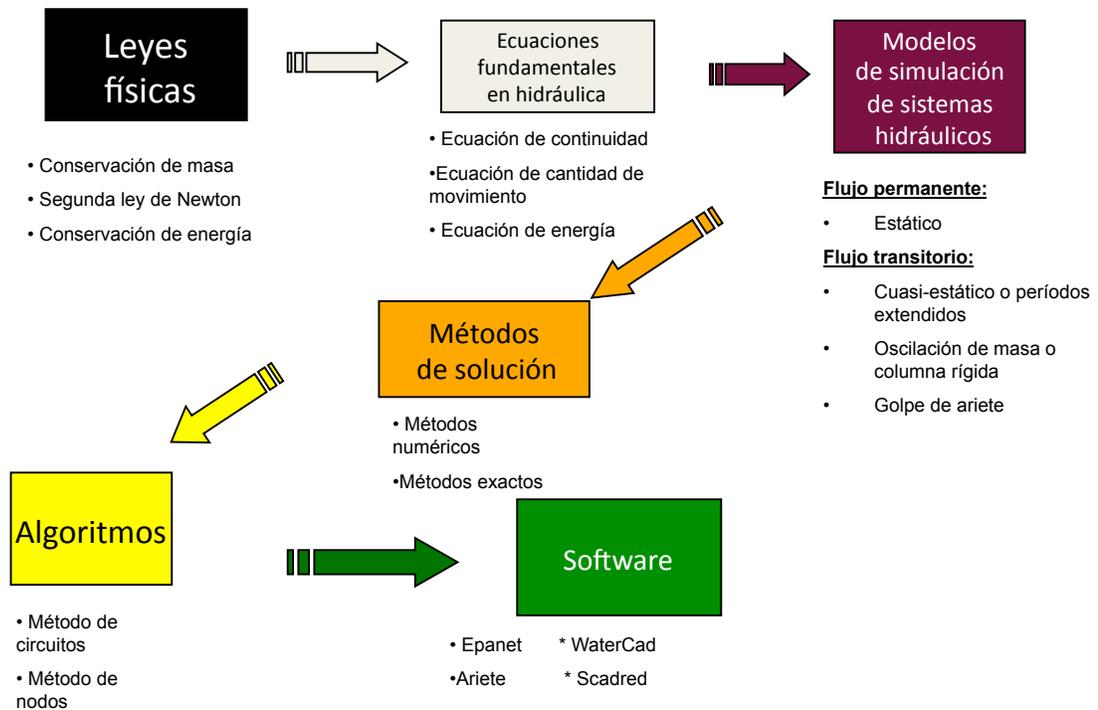


Figura 3-3. Fases de la modelación de los sistemas hidráulicos a presión.

En términos generales, los modelos de redes de distribución de agua potable se construyen mediante nodos, tramos, condiciones iniciales y de frontera. Los nodos pueden ser simples cuando solo representan uniones de tuberías; o bien, especiales, cuando además reproducen demandas de agua de usuarios, fugas, tanques, depósitos, y cuerpos de agua (acuíferos, manantiales, presas, etc.). Los tramos pueden solo representar tuberías, o también tramos con válvulas y equipos de bombeo. En la Figura 3-4 se muestra un esquema típico de una red, representada por 11 nodos y 13 tramos.

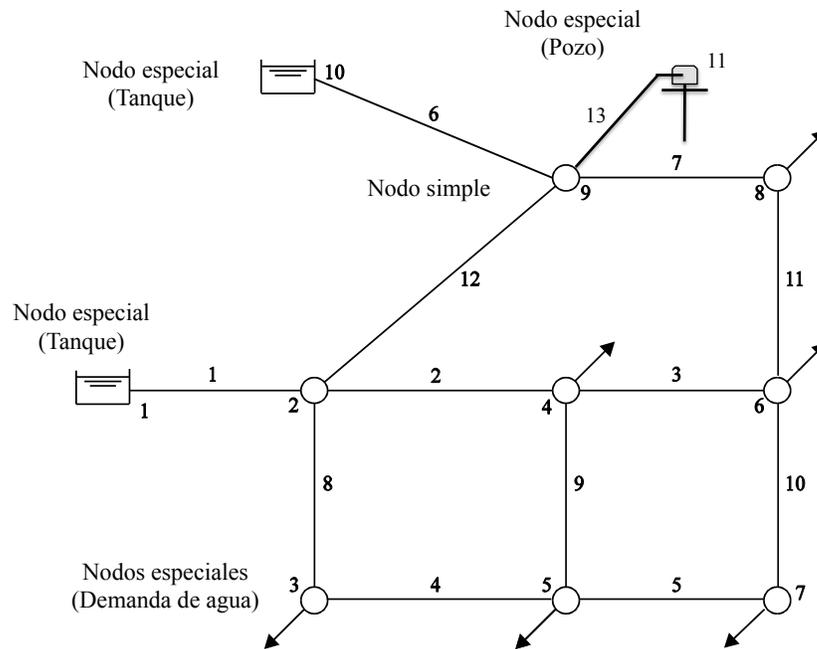


Figura 3-4. Esquema típico de un modelo de red de distribución de agua potable.

La modelación hidráulica de redes de agua potable se realiza en flujo permanente o en períodos extendidos; esto es, cuando las variaciones de presión y velocidad son lentas en el tiempo y no se provocan efectos de aceleración en el flujo o de elasticidad en la tubería y el fluido. En estos casos, se aplican las dos leyes de Kirchhoff (*Ref. 3.1*), una referente a la continuidad que enuncia “La suma de los caudales que entran y salen de un nodo es igual a cero” (ecuación 3.1); y otra, relacionada con la conservación de la energía que dicta “La suma de las pérdidas de carga hidráulica en un circuito de la red es igual a cero” (ecuación 3.2).

$$\sum_{j=1}^m Q_{i,j} + q_i = 0 \quad i = 1, 2, 3 \dots I \quad (3.1)$$

$$\sum_{j=1}^n \Delta H_{k,j} = 0 \quad k = 1, 2, 3 \dots K \quad (3.2)$$

Donde:

$Q_{i,j}$ = Caudal por la tubería j , que entra o sale del nodo i (L/s).

q_i = Caudal de demanda de agua, extraído de la red en el nodo i (L/s).

$\Delta H_{k,j}$ = Pérdida de carga en la tubería j (metros), del circuito k de la red (ecuación 3.3).

m = Número de tramos que confluyen a un nodo i de la red.

n = Número de tuberías que conforman cada circuito k en la red.

I = Número de nodos en la red.

K = Número de circuitos en la red.

La ecuación que se recomienda utilizar para calcular las pérdidas de carga hidráulica, $\Delta H_{k,j}$ es la de Darcy-Weisbach, la cual se expresa como:

$$\Delta H_{k,j} = \left(f \frac{0.81 * L}{g * D^5} Q^2 \right)_{k,j} \quad (3.3)$$

Donde:

L = Longitud de la tubería j , en m.

D = Diámetro de la tubería j , en m.

g = Aceleración de la gravedad, en m/s^2 .

Q = Caudal en la tubería j , en m^3/s .

f = Coeficiente de cortante en la tubería j , que se obtiene de fórmulas semiempíricas.

En la *Figura 3-5* se representa esquemáticamente la aplicación de las leyes de Kirchhoff; en el nodo $i=1$ la suma del caudal que entra debe ser igual a la suma de los dos caudales que salen por las tuberías, más el caudal de la demanda. En el circuito $k=3$, la suma de las pérdidas de carga de las tuberías 8, 9, 10 y 11 debe ser igual a cero.

Aplicando estas ecuaciones en cada nodo y circuito de la red, se obtiene un sistema de ecuaciones que debe resolverse simultáneamente, junto con las condiciones de frontera y a partir de una condición inicial; con la solución se obtiene el valor de la carga hidráulica (o presión) en cada nodo y la velocidad y el caudal en cada tramo en condiciones de flujo permanente.

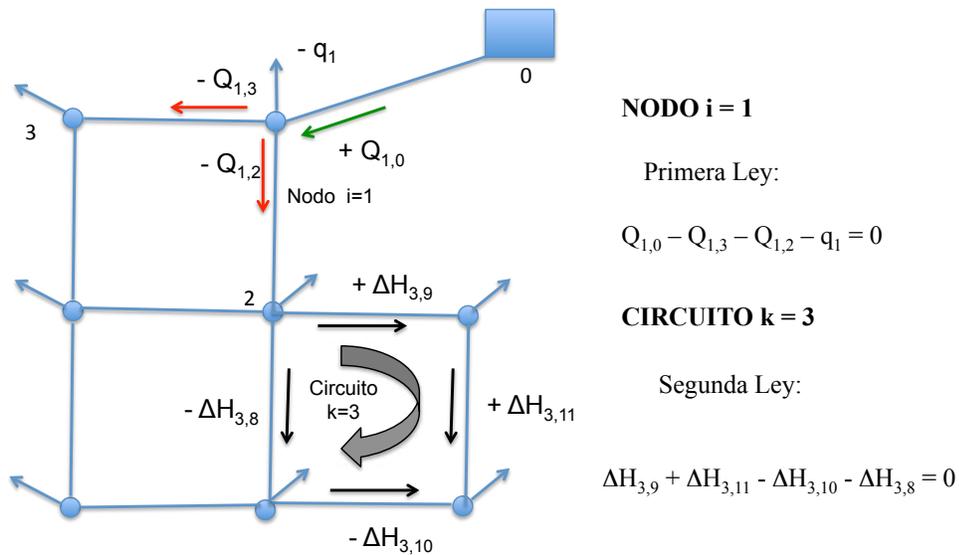


Figura 3-5. Aplicación de las leyes de Kirchoff a una red.

Las condiciones de frontera son relaciones conocidas de velocidad y presión en un punto de la red de distribución; algunos tipos de estas fronteras son:

- a) Sitios en los que se tiene una bomba; la curva característica de operación de la bomba se obtendrá la información para definir las condiciones de frontera.
- b) Desfogues en la red. En este caso, la condición de frontera será la ecuación de la descarga de agua por un orificio a la atmósfera.
- c) Sitios en donde existe un tanque de regulación; la condición de frontera será la presión o carga hidráulica generada por la altura del tanque.
- d) Válvula de control intermedia entre dos tuberías; la condición de frontera será la ecuación de pérdida de carga de dicha válvula.

Las diversas demandas de agua de los usuarios, que se otorgan por las conexiones domiciliarias en cada tramo de la red, en el modelo se consideran como demandas de agua concentradas en los nodos, tal como se muestra en la Figura 3-6. El valor de este caudal de demanda en el nodo se determina en forma proporcional a la longitud de la tubería representada, o por áreas tributarias o a la densidad de usuarios.

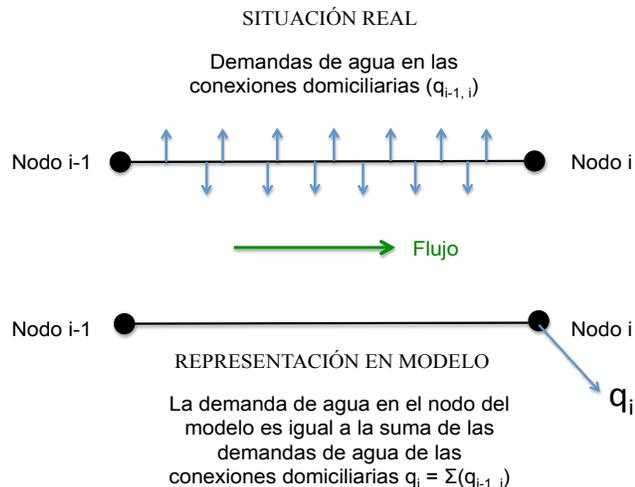
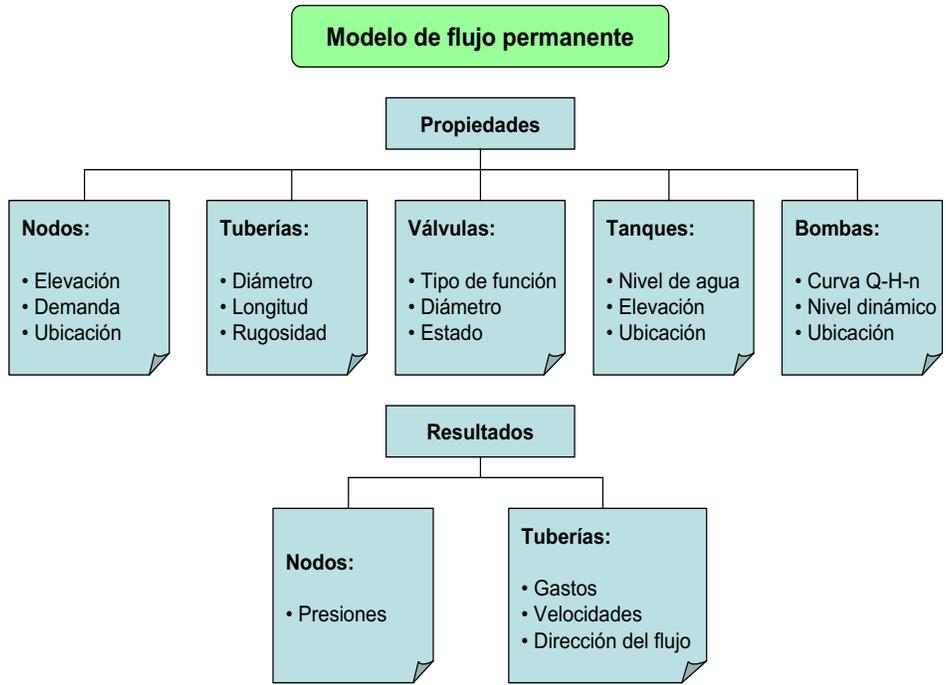
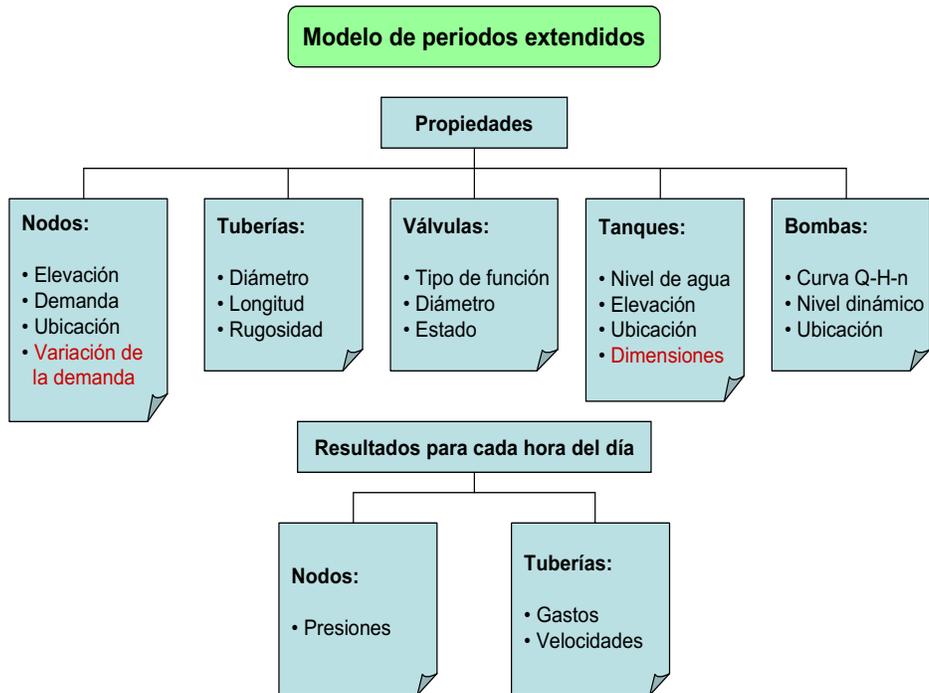


Figura 3-6. Representación de demandas de agua en el modelo de la red.

Los datos necesarios o propiedades que identifican a los elementos de un modelo, tanto para flujo permanente como para simulación en períodos extendidos, se muestran en los diagramas de la *Figura 3-7*. Cuando se trata de modelación hidráulica en períodos extendidos, se debe incluir una curva de variación horaria de la demanda de agua en cada nodo y las dimensiones de los tanques reguladores.



a. Propiedades y resultados en el modelo de simulación de flujo permanente.



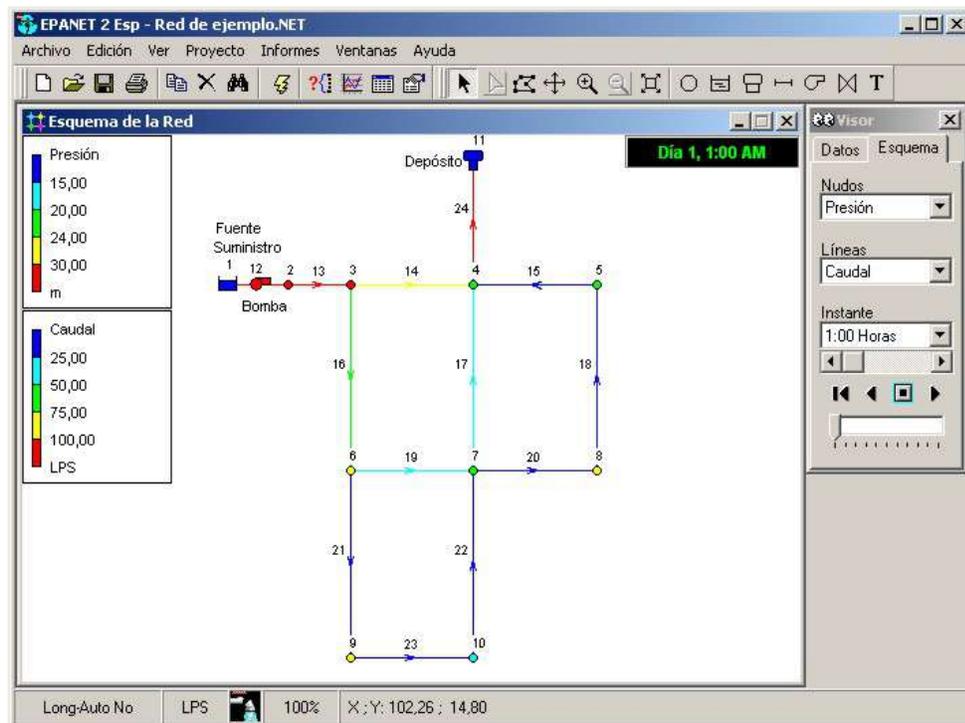
b. Propiedades y resultados en el modelo de simulación de flujo períodos extendidos.

Figura 3-7. Propiedades y resultados en el modelo de simulación de flujo permanente y períodos extendidos.

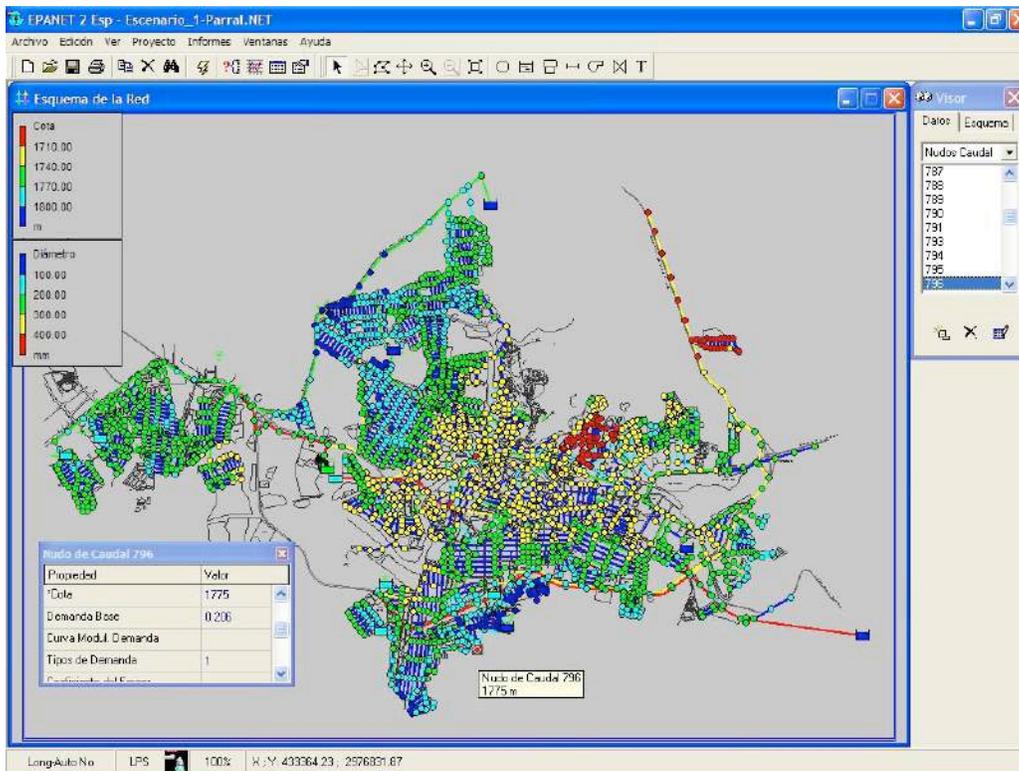
3.2.1.2 Software comercial para la modelación de redes de agua potable

En la actualidad, existen en el mercado diferentes programas de cómputo (software) que permiten conformar modelos hidráulicos de redes de abastecimiento en ambientes gráficos y realizar el cálculo de las variables de presión, caudal y velocidad de manera rápida y precisa. Estas ventajas pueden ser ahora aprovechadas para mejorar los análisis de redes complejas como las de las grandes ciudades, reproduciendo todos los tramos y elementos de estas redes de agua potable. Esto conlleva a potenciar la cantidad de alternativas de operación que se pueden analizar en el sistema de abastecimiento y de lograr resultados de configuraciones de la red con una operación eficiente. Dentro de todos estos programas de cómputo destacan los siguientes: *Epanet (USA-España)*, *Scadred (México)*, *Watercad (USA)*, *InfoWorks (Inglaterra)*.

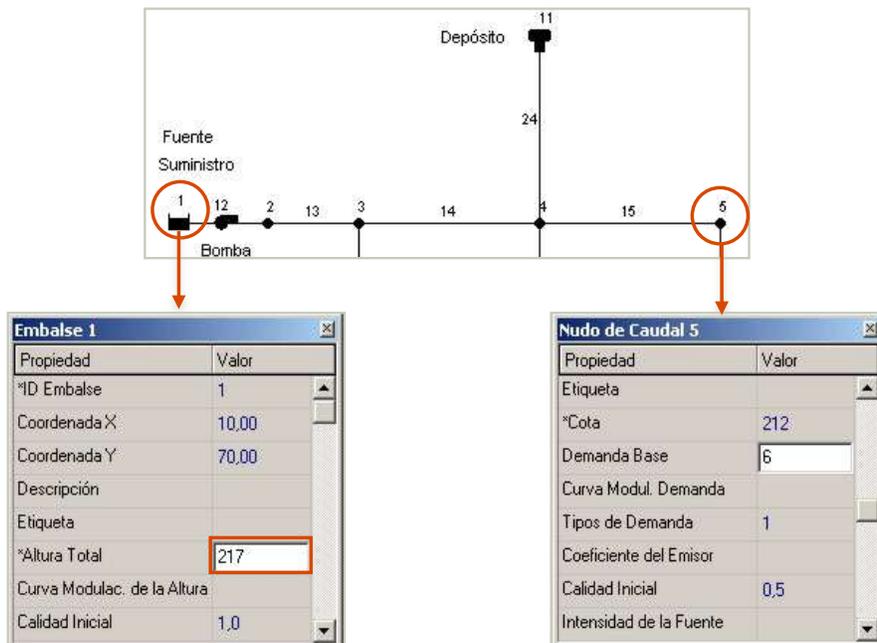
La selección de alguno de ellos depende, principalmente, de la aplicación deseada y de la rentabilidad de su beneficio-costos. En particular, el *Epanet* es uno de los programas para el análisis de redes hidráulicas más difundido a nivel mundial. Ha sido desarrollado por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (USEPA) y es un programa de dominio público, por lo que puede ser gratuitamente copiado y distribuido. Existe una versión de este programa en el año 2000 que fue traducida al español por la Universidad Politécnica de Valencia, en España (Ref. 3.2). El *Epanet* es un programa que proporciona un entorno integrado bajo ambiente Windows para la edición de los datos de entrada a la red y la visualización de resultados en una amplia variedad de formatos. No existe límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesarse y tiene cierta compatibilidad con archivos tipo “W-Metafile” para la visualización de la traza urbana como fondo y a escala real. En la Figura 3-8 se muestran varios detalles del entorno gráfico y físico de este programa Epanet.



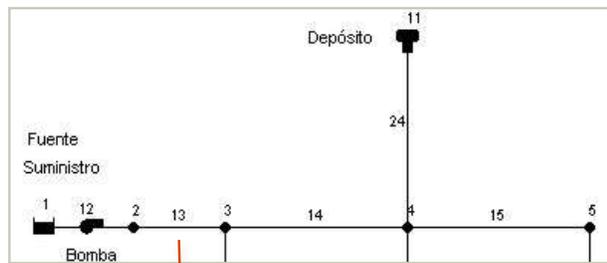
3.8.a. Vista general del ambiente gráfico de Epanet.



3.8.b. Vista de un modelo de una red de agua potable real en el modelo Epanet.



3.8.c. Cuadros para captura de propiedades de los nodos.



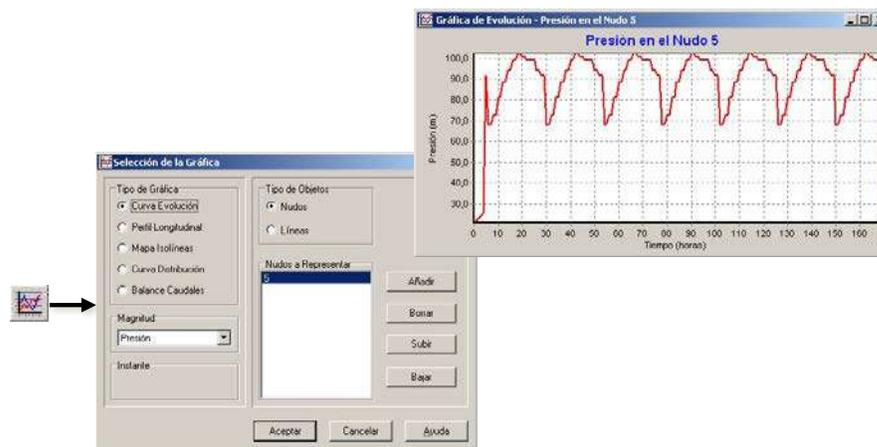
Propiedad	Valor
*ID Tubería	13
*Nudo Inicial	2
*Nudo Final	3
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	3212
*Diámetro	450
*Rugosidad	1

3.8.d. Cuadro de captura de propiedades de tuberías.

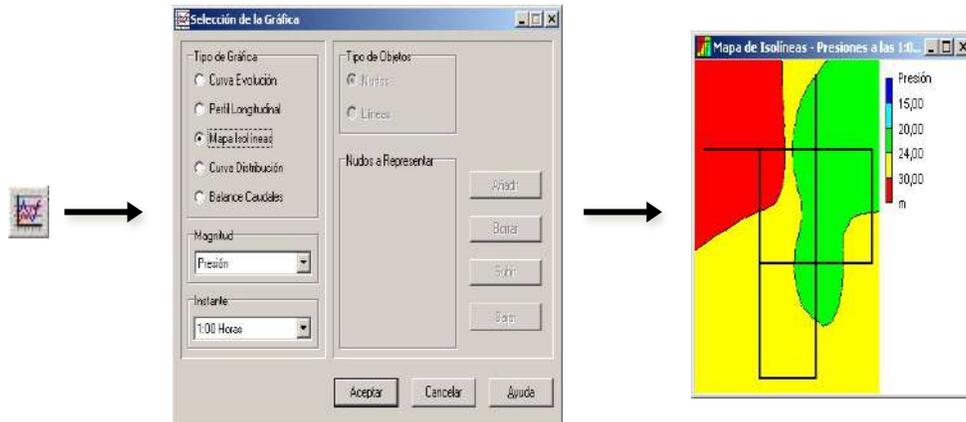
The workflow involves three main components:

- Bomba 12**: Properties dialog showing ID 12, suction node 1, and discharge node 2. The characteristic curve is set to 1.
- Editor de Curvas de Comportamiento**: A dialog for defining the pump curve. The equation is $Altura = 100.00 - 0.0025 (Caudal)^2$. A table shows a flow rate of 100 LPS resulting in a head of 75 meters.
- Gráfico de Evolución**: A graph showing the pressure evolution at node 5 over time, with pressure fluctuating between approximately 70 and 100 meters.

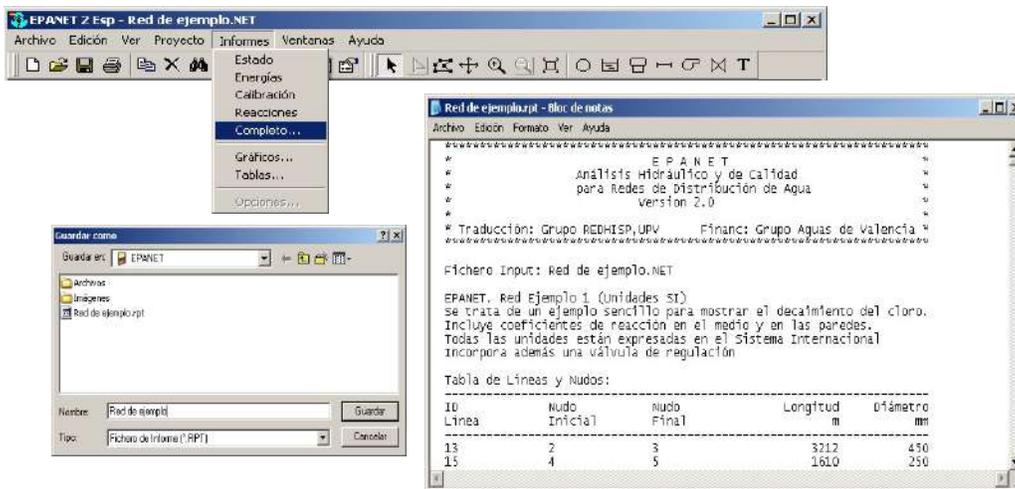
3.8.e. Cuadros para captura de propiedades de los equipos de bombeo.



3.8.f. Resultados gráficos en Epanet.



3.8.g. Graficas de visualización de resultados.



3.8.h. Archivos de datos y resultados

Figura 3-8. Entorno gráfico del programa Epanet V.2.0 en español.

En el Cuadro 3-1 se muestran una lista de alguno de los modelos desarrollados en México en el programa Epanet V 2.0 en español, desde el año 2006 hasta el 2012 (Ref. 3.3). Se observa que existe una cierta correlación entre el número de conexiones domiciliarias de la red y el número de nodos del modelo de simulación hidráulica (Figura 3-9).

Cuadro 3-1. Listado de modelos elaborados por el autor en programa Epanet (Ref. 3.3).

Ciudad	Número de conexiones	Número de nodos	Número de tramos	bombes y depósitos
Zihuatanejo, Gro.	16,663	2,168	2,529	8 y 3
Tejalpa, Mor.	6,186	930	872	4 y 2
Metepec, Edomex	43,463	3,251	3,701	45 y 42
Monclova, Coah.	70,615	5,344	6,119	8 y 30
Parral de Hidalgo, Chih.	29,958	2,438	2,701	2 y 21
Nogales, Son.	42,014	4,803	5,028	56 y 23
Guaymas, Son.	34,200	3,729	4,104	52 y 38
Durango, Dgo.	133,407	11,482	13,362	69 y 20

<i>Toluca, Edomex</i>	83,238	7,921	8,947	46 y 13
<i>Juchitán, Oax.</i>	17,330	3,016	3,332	7 y 7
<i>Cuernavaca, Mor.</i>	93,930	12,032	12,054	103 y 45
<i>Acámbaro, Gto.</i>	15,799	2,572	2,718	21 y 21
<i>Celaya, Gto.</i>	103,731	11,605	14,641	129 y 66
<i>Cd. Valles, SLP.</i>	50,423	5,350	5,733	14 y 18

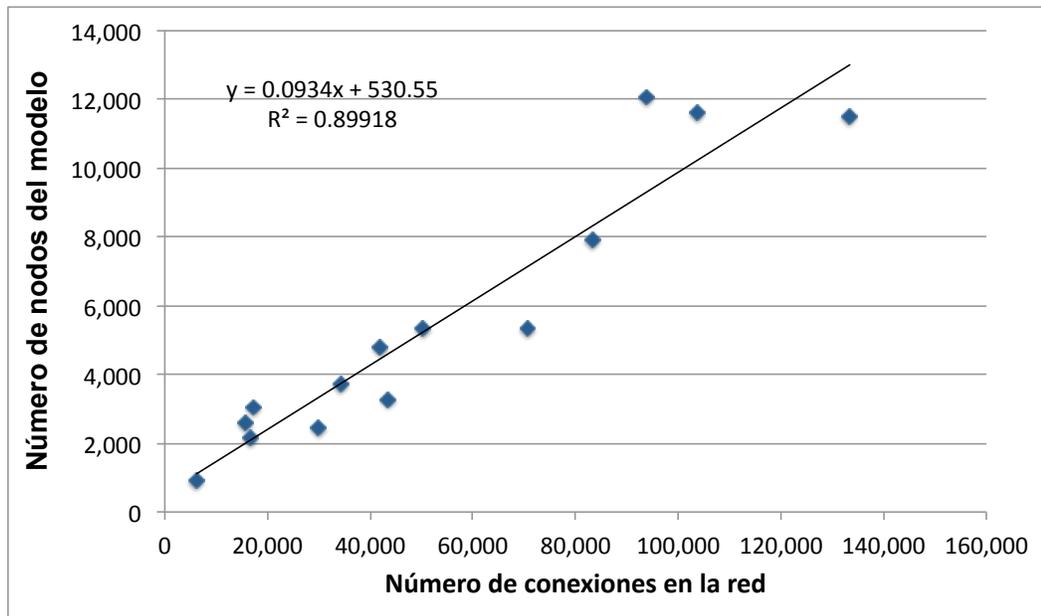


Figura 3-9. Relación de conexiones domiciliarias de la red contra nodos en el modelo de simulación (Ref. 3.3).

3.2.1.3 Aplicación práctica de la modelación hidráulica en la sectorización de la red

Como se mencionó anteriormente, durante la etapa de diseño de la sectorización de la red de agua potable se tendrán que conformar dos modelos de simulación: uno para la red secundaria conformada por los sectores y, otro, para la red primaria de entrega de agua en bloque. En seguida, se presentan algunas consideraciones prácticas, que se sugiere tomar en cuenta para realizar esta actividad.

En primer lugar, para construir los modelos de simulación enfocados hacia el diseño de la sectorización de la red de agua potable es necesario que se disponga de la información y datos siguientes:

- Planimetría urbana digital de la localidad, actualizada y georreferenciada.
- Planos confiables de la red de agua potable.
- Información técnica de la infraestructura hidráulica referente a fuentes de abastecimiento y obras de captación, tanques, re-bombes, líneas de conducción y red de distribución.
 - Operación actual de la red y problemas asociados.
 - Número y tipo de conexiones domiciliarias.
 - Registro de volúmenes producidos, suministrados y consumidos.
 - Volumen de agua perdido y porcentaje de fugas en la red.
 - Topografía de la zona de estudio.
 - Curva típica del comportamiento de la variación horaria de la demanda de agua.
 - Curvas características de operación actual de los equipos de bombeo.

- Registro de las mediciones de presión y caudal en la red en llegadas de tanques y rebombeos.

Una vez recolectada la información y datos, se debe elaborar el armado o “esqueletización” de las redes secundaria y primaria. Esto se puede hacer de diversas maneras, dependiendo de las facilidades y herramientas que disponga el software comercial que se utilice. El esqueleto de cada una de estas redes es el conjunto de nodos y tramos que conforman la estructura principal de los modelos, es decir el grupo de elementos que simularán el comportamiento hidráulico. Es recomendable que se utilice la planimetría de la ciudad como fondo de los modelos, de preferencia que esté georreferenciada con la escala universal UTM (*Universal Transversal Mercator*), para que sea compatible con los planos y se puedan identificar rápidamente los sitios de la red en el momento del análisis. Además, es deseable que contenga información de la traza de calles y los límites de los sectores de anteproyecto, con la finalidad de facilitar la localización de la infraestructura durante el análisis hidráulico.

Ejemplo)

En la Figura 3-10 se muestra la planimetría de fondo que se utilizó para el trazo de los modelos de las redes secundaria y primaria de una zona de la ciudad de México y en las Figura 3-11 y Figura 3-12 se presentan imágenes de la esqueletización respectiva, utilizando el programa Epanet V 2.0 español.

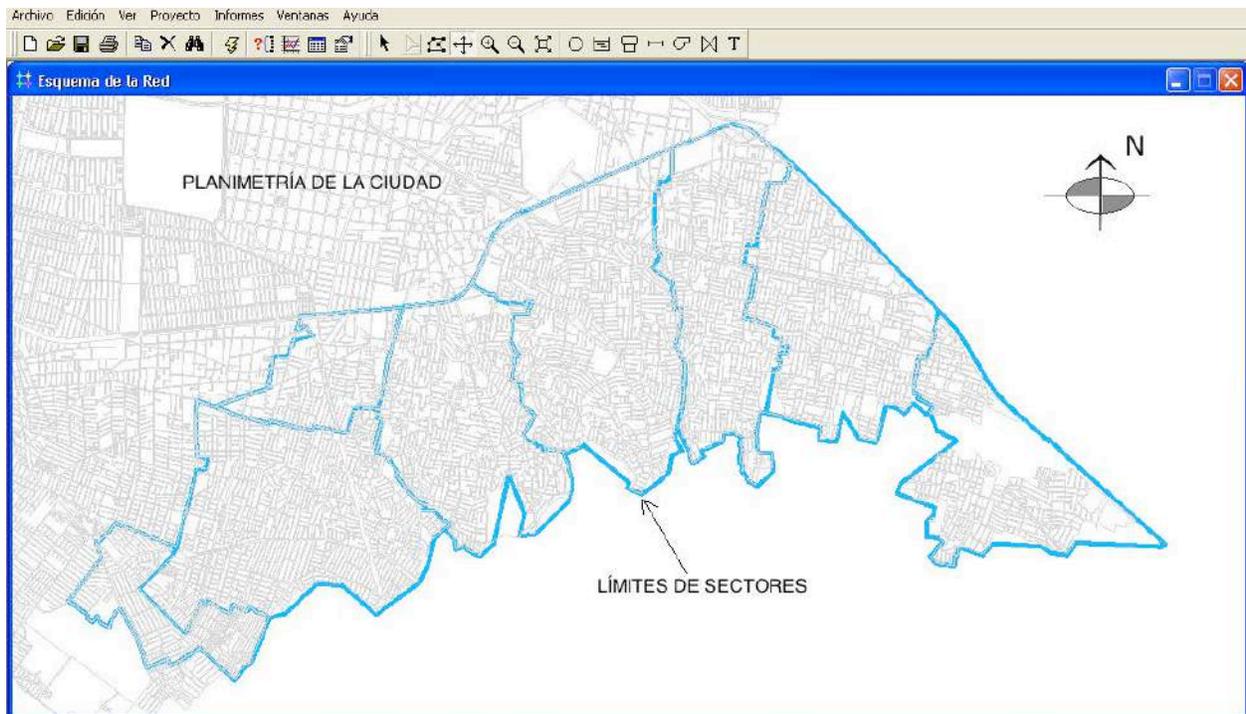


Figura 3-10. Fondo de referencia para el modelo de simulación hidráulica de la red de agua potable de una zona de la ciudad de México.

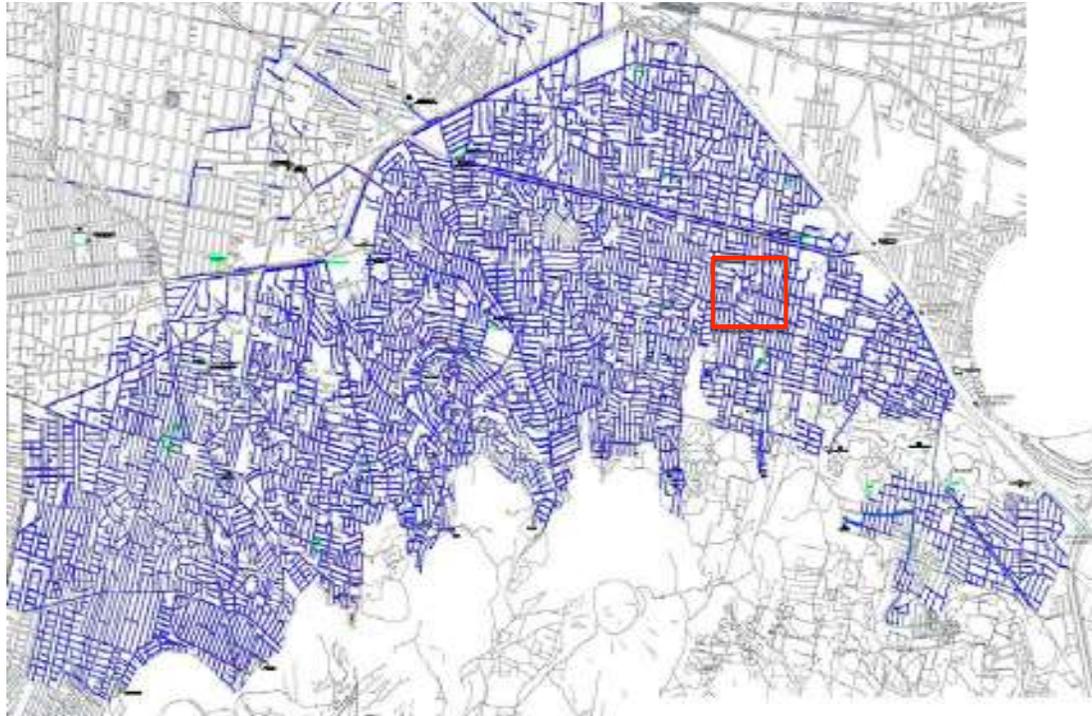


Figura 3.11.a. Plano de la red secundaria.

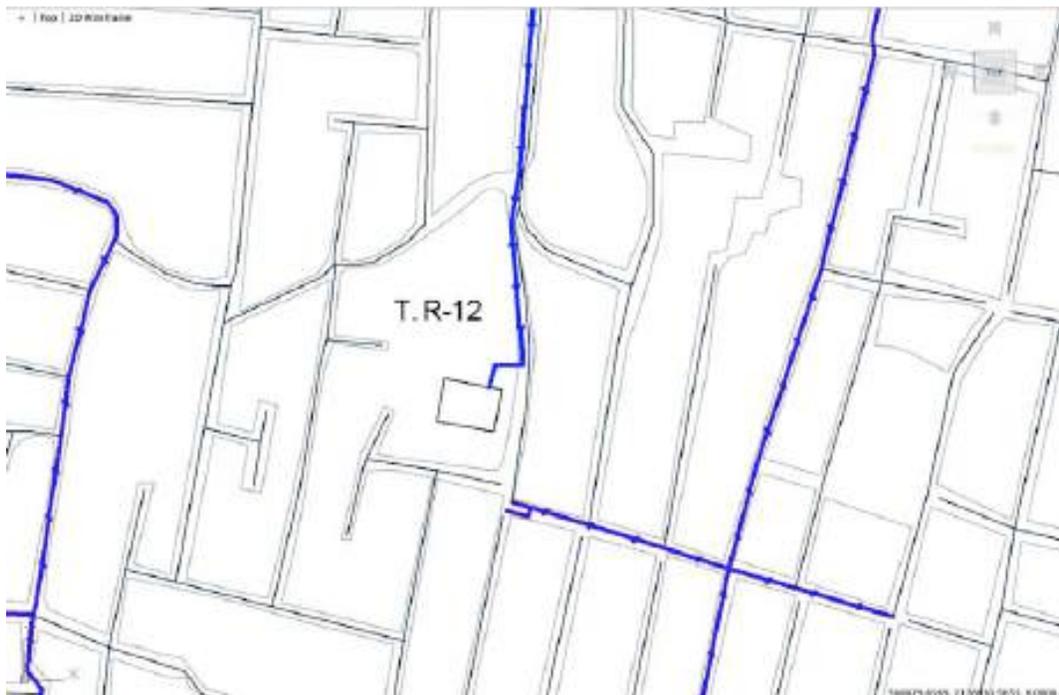


Figura 3.11.b. Detalle del plano de la red secundaria.

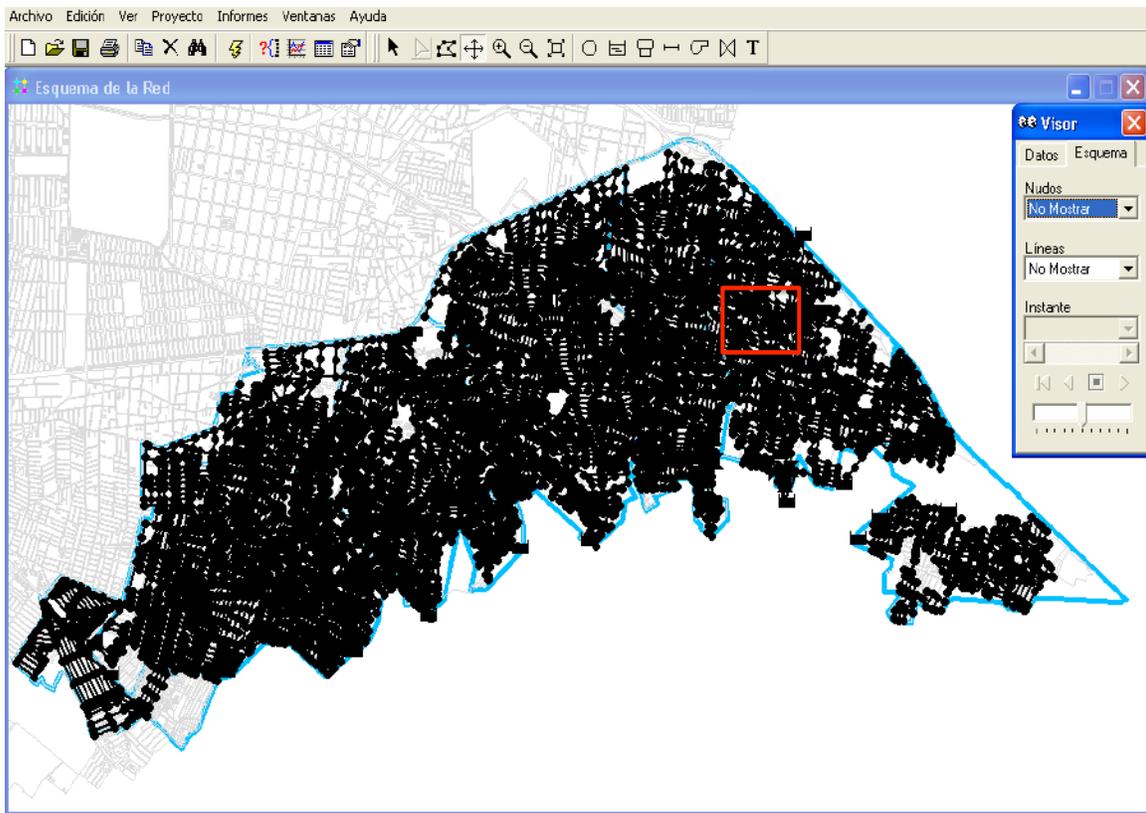


Figura 3.11.c. Esqueleto del modelo de simulación hidráulica de la red secundaria.

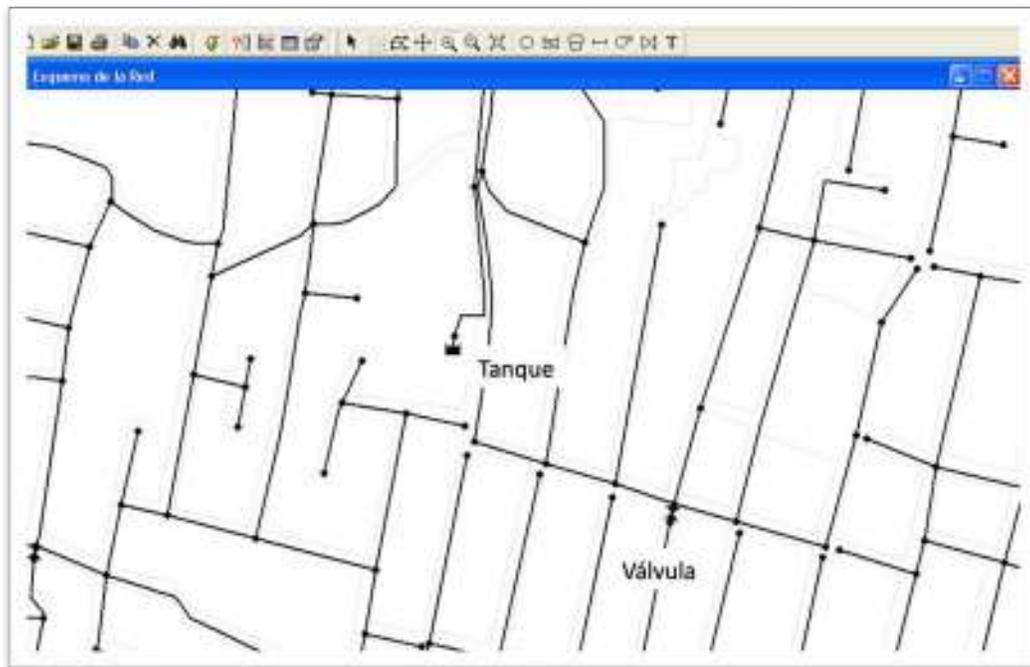


Figura 3.11.d. Detalle del esqueleto del modelo de la red secundaria.

Figura 3-11. Esqueletización de la red secundaria de una zona de la ciudad de México.

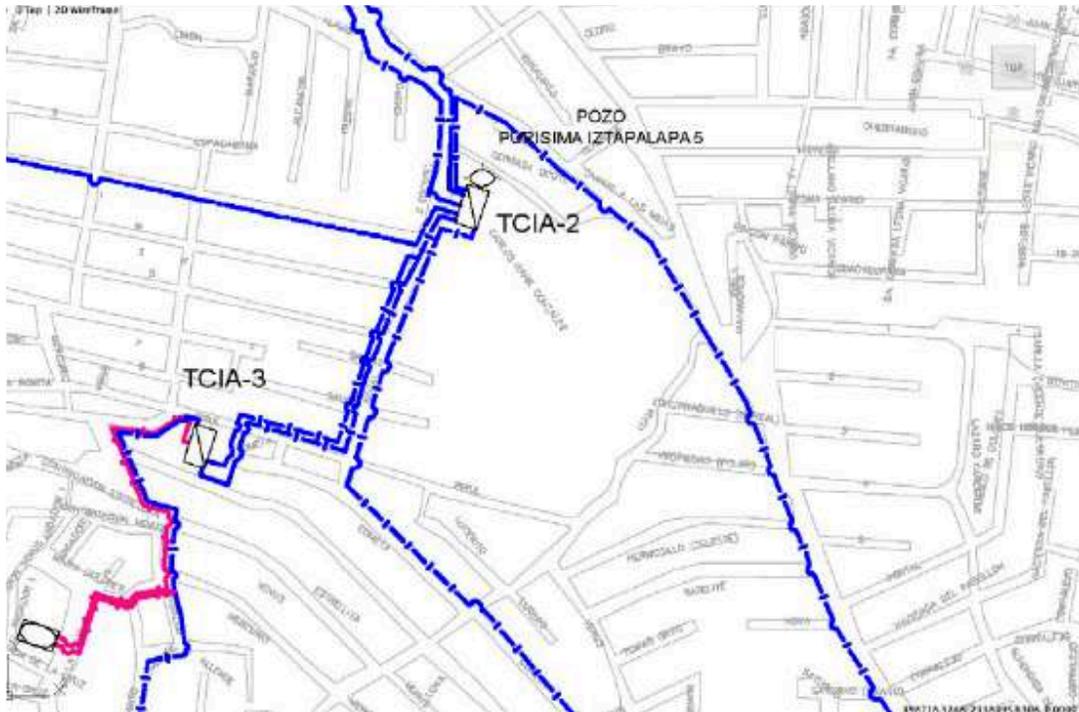


Figura 3.12.c. Detalle en el plano de la red primaria de agua potable.

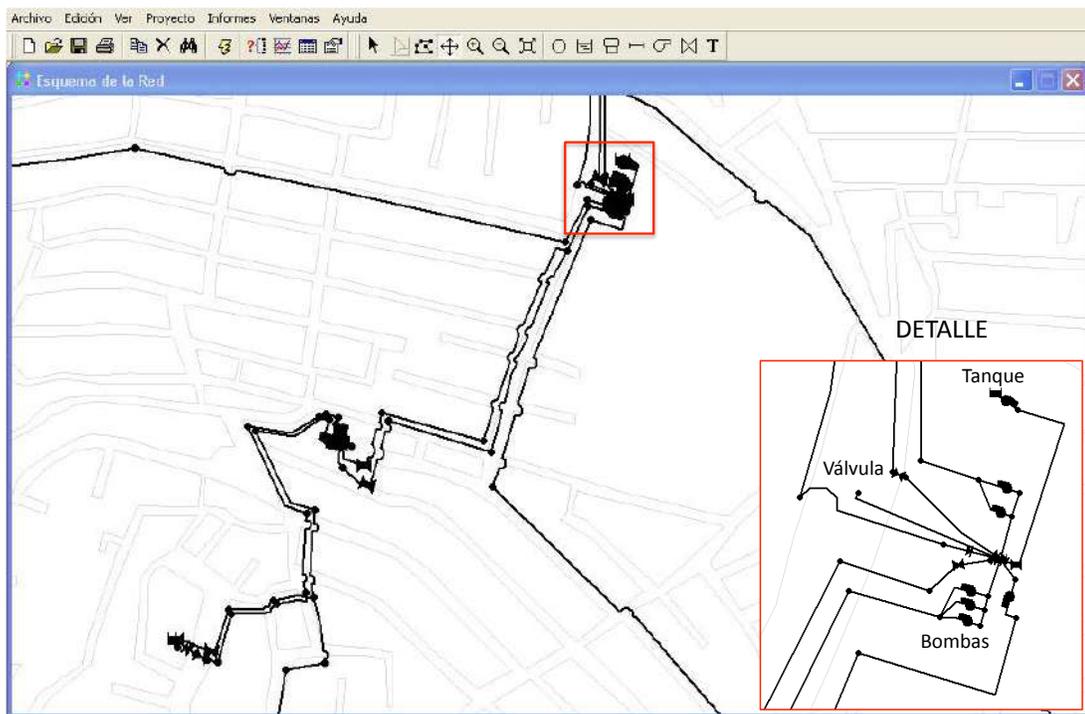


Figura 3.12.d. Detalle del esqueleto del modelo de la red primaria.

Figura 3-12. Esqueletización de la red primaria de una zona de la ciudad de México.

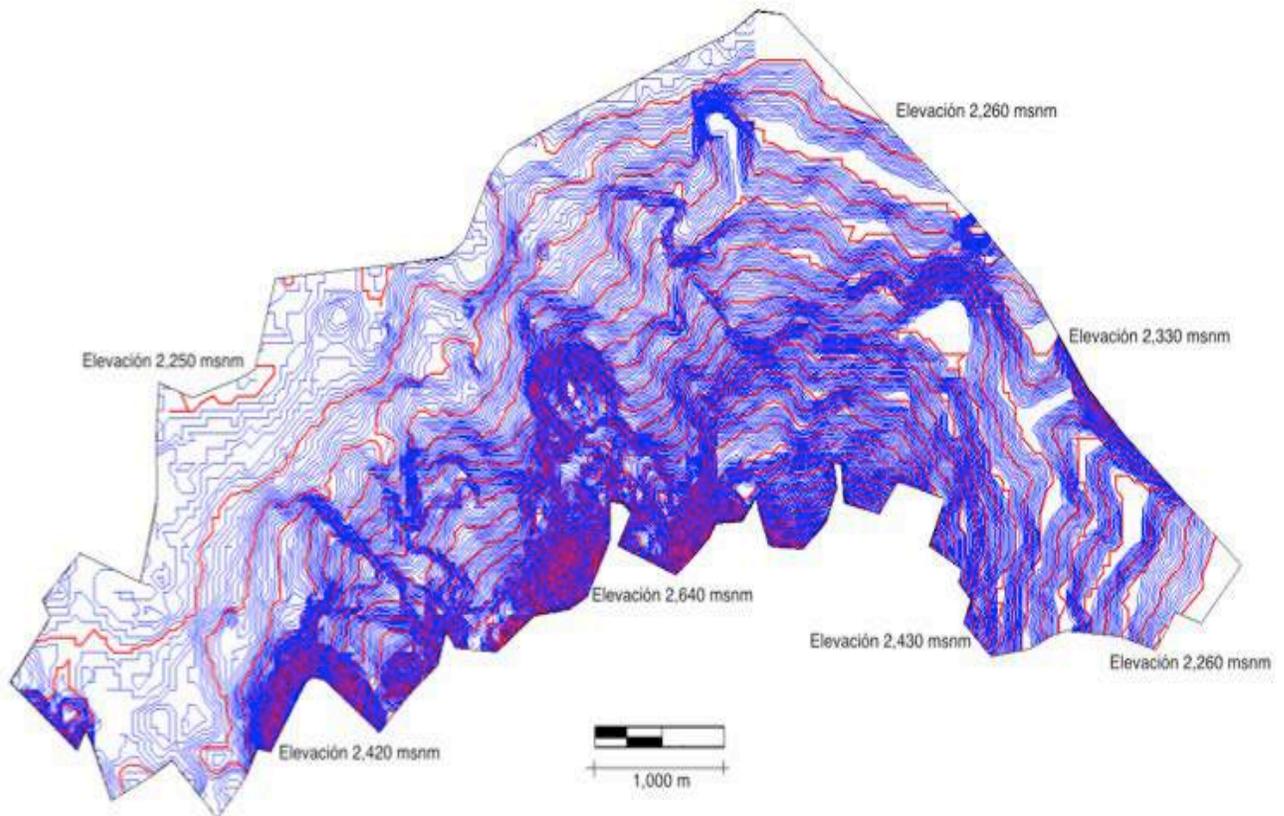
Después de trazar los esqueletos de las redes secundaria y primaria, se introducen las propiedades (datos) de sus elementos. Para los nodos simples se asignan las elevaciones y demandas; para las tuberías

se introduce su diámetro, longitud y rugosidad; para los nodos especiales se capturan sus características hidráulicas.

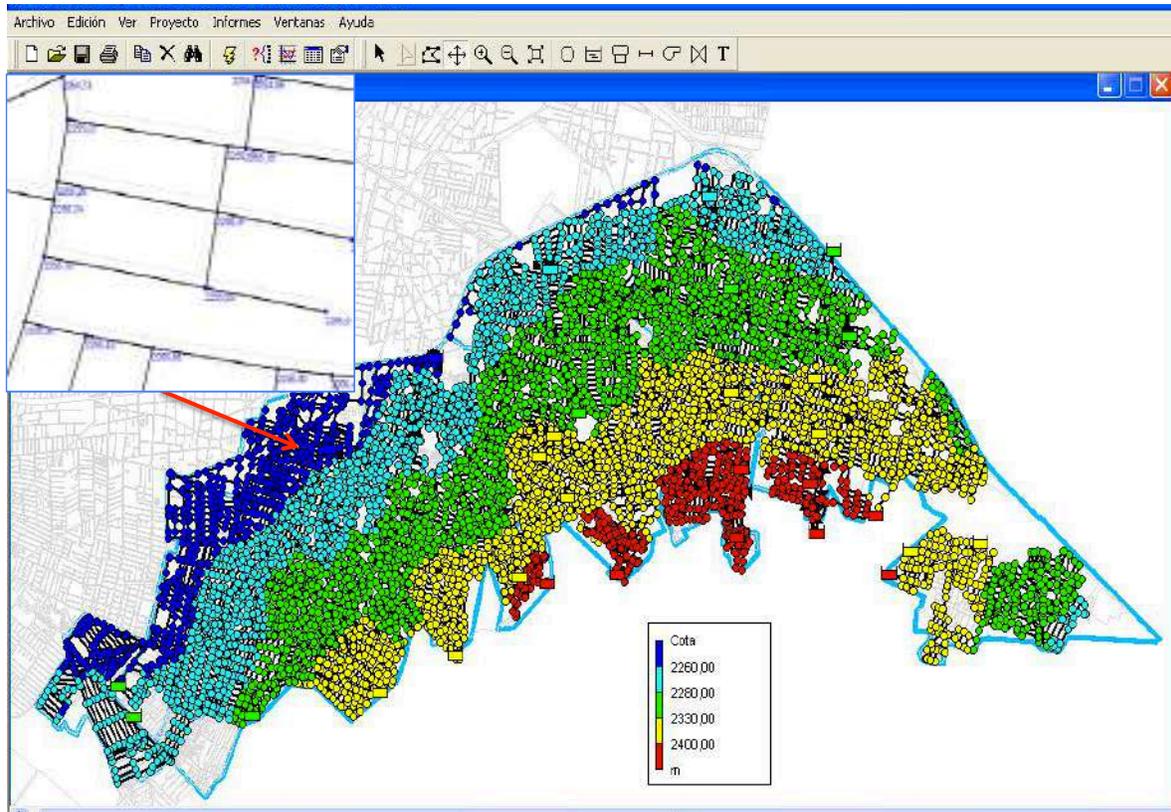
La asignación de elevaciones en los nodos se realiza en forma manual nodo por nodo, o utilizando un simulador que cuente con la herramienta de asignación automática de cotas, a partir de una malla de puntos o curvas de nivel.

Ejemplo)

En la Figura 3-13 se muestra el ejemplo del modelo de simulación hidráulica con las cotas de todos sus nodos incorporadas.



a. Curvas de nivel de la topografía de la zona.



b. Vista de cotas en el modelo de simulación hidráulica.

Figura 3-13. Cotas del modelo de simulación del ejemplo de la zona de la ciudad de México.

La captura de las caudales de demandas de agua en los nodos se puede hacer por grupos de sectores hidráulicos, colonias, zonas de cobro, consumos unitarios por calle, etc. La fórmula para asignar los caudales de demandas de agua en los nodos es la siguiente:

$$q_{nodo} = \frac{Q_{dz}}{I_z} \quad (3.4)$$

Donde:

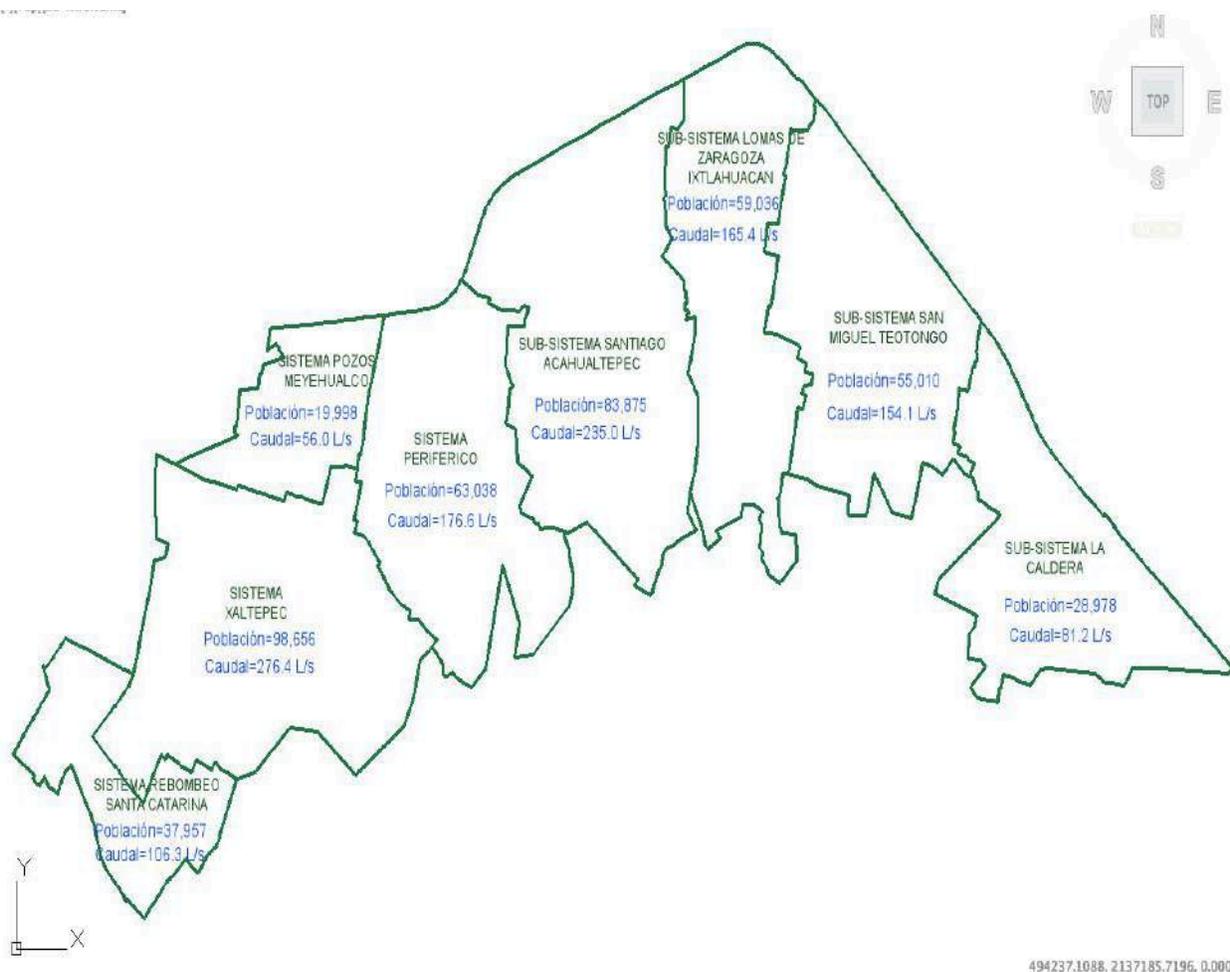
- q_{nodo} = Caudal de demanda asignado en un nodo, en L/s
- Q_{dz} = Caudal demandado en una zona, colonia, sector, etc., en L/s
- I_z = Número de nodos de una zona, colonia, sector, etc.

Ejemplo)

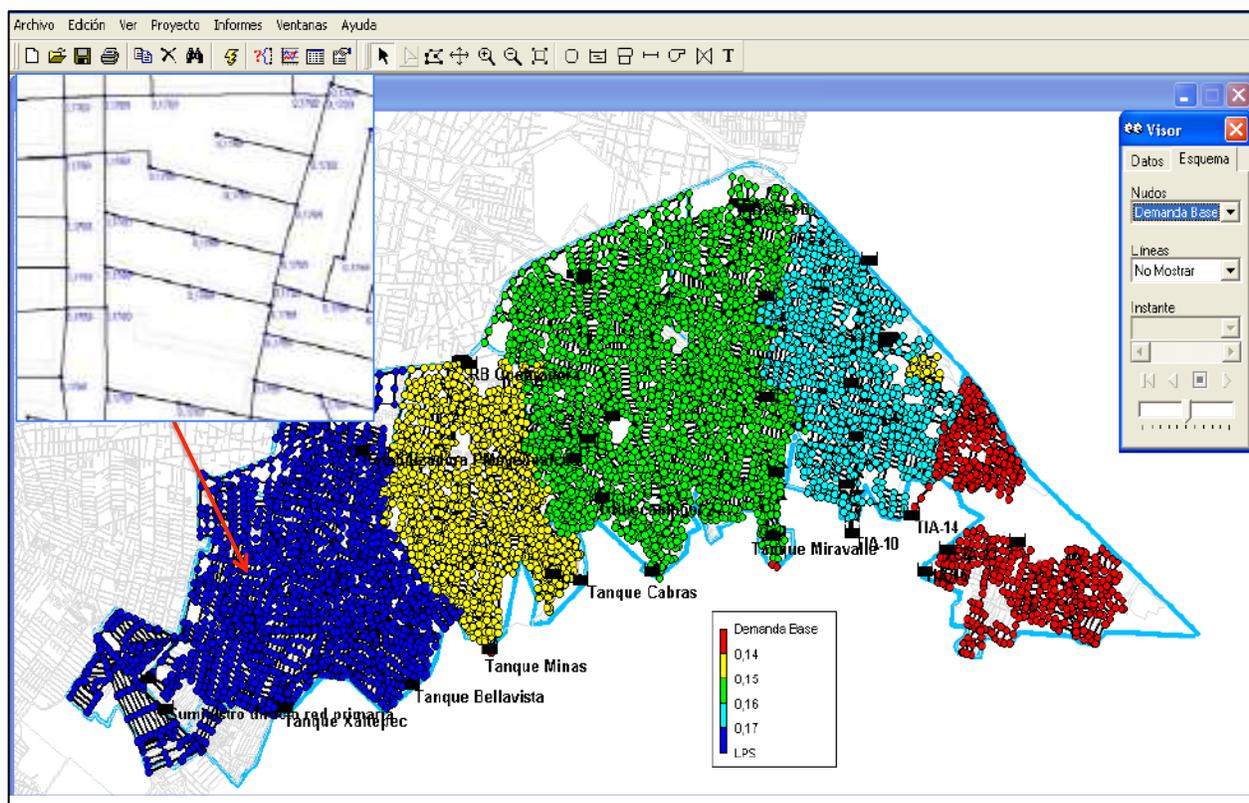
En el Cuadro 3-2 se presenta un ejemplo de la asignación del caudal de demanda en el modelo de simulación hidráulica y en la Figura 3-14 se muestra una imagen de los sectores de anteproyecto y del modelo con los caudales de demanda de agua máxima horaria que se capturaron para dichos sectores de distribución.

Cuadro 3-2. Ejemplo del cálculo del caudal de demanda en cada nodo del modelo de la red secundaria de una zona de la ciudad de México.

No	Subsistema	Caudal de demanda máxima horaria Año 2021 (L/s)	No. de Nodos de Consumo del Modelo	Caudal en cada nodo del modelo de red secundaria (L/s)
1	Caldera	81.18	587	0.1383
2	S. Miguel Teotongo	154.11	946	0.1629
3	Lomas de Zaragoza Ixtlahuacán	165.39	1,067	0.1550
4	Santiago Acahualtepec	234.98	1,549	0.1517
5	Periférico	176.60	1,187	0.1488
6	Pozos Meyehualco	56.02	319	0.1756
7	Xaltepec	276.38	1,562	0.1769
8	Rebombeo Santa Catarina	106.34	223	0.3468
TOTAL		1,251	7,440	0.168



3.14.a. Sectores de anteproyecto con los caudales de demanda máxima horaria a distribuir en la red secundaria.



3.14.b. Vista del modelo de simulación hidráulica con las demandas asignadas en los nodos.

Figura 3-14. Caudales de demanda de agua máxima horaria en el modelo de simulación

La longitud de la tubería queda definida durante el trazo del esqueleto, mientras que el diámetro y la rugosidad deben ser dadas para cada tubo del sistema. Como ya se mencionó, la ecuación de pérdidas de energía recomendable a utilizar es la ecuación de Darcy-Weisbach, puesto que es válida para cualquier condición de flujo laminar o turbulento. No se debe olvidar que en un proyecto de sectores existen muchas tuberías antiguas, por lo que se debe considerar esta situación para elegir los valores de rugosidad respectivos. De cualquier manera, en estas condiciones es muy probable que los valores de la rugosidad se modifiquen durante el proceso de calibración del modelo.

En el caso de los equipos de bombeo es necesario introducir en el modelo parejas de valores de carga-caudal (Q-H), extraídos de las curvas proporcionadas por los fabricantes, como la que se muestra en la Figura 3-15, o de las que se obtienen con mediciones de campo.

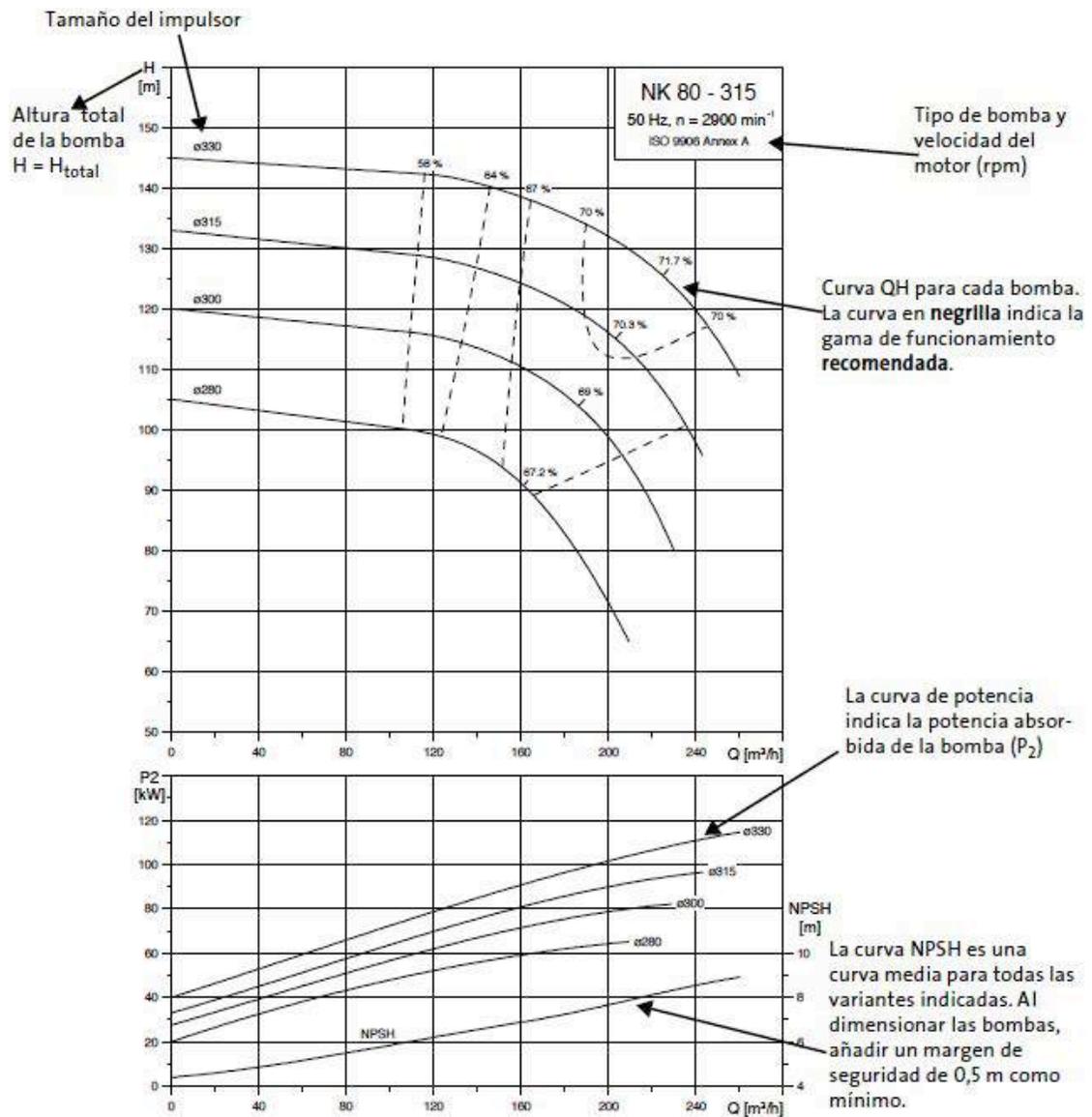


Figura 3-15. Curva característica típica de operación de equipos de bombeo de fabricantes.

Fuente: Catálogo de fabricante de bombas "Grundfos"

Ejemplo)

En el modelo de la zona de la ciudad de México se introdujeron las curvas de las mediciones realizadas en campo, tal como se muestra en la Figura 3-16.

Sistema Rebombado TCIA-3 Equipo No. 2		
Gasto (L/s)	Carga (m.c.a.)	Eficiencia (η)
40.2	70.3	58.3
36.87	79.67	60.72
31.12	90.51	65.32
26.28	95.37	63.51

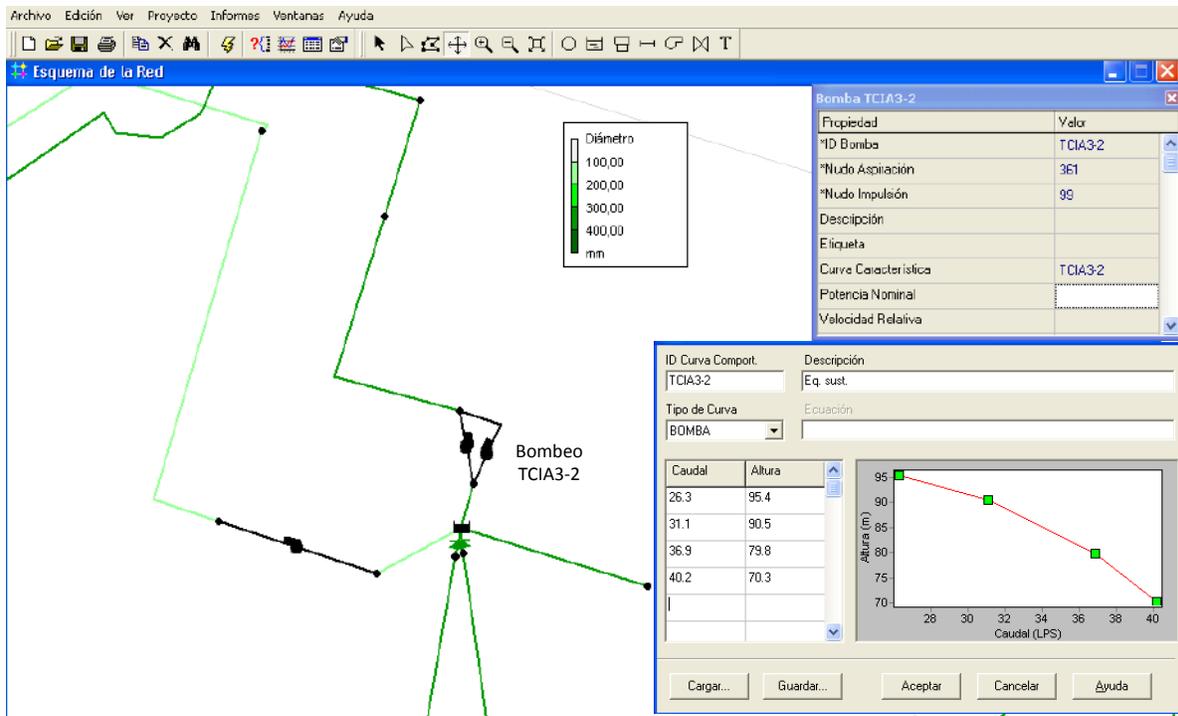
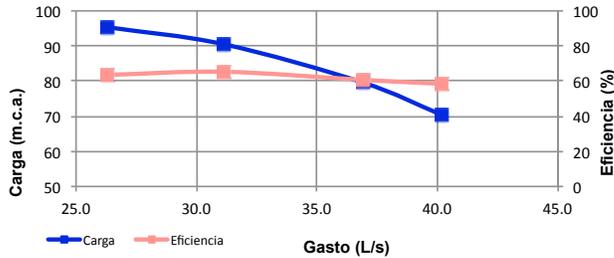


Figura 3-16. Curva de bombeo medida en campo y capturada en el modelo de simulación de la red primaria.

En cuanto a las válvulas, en el modelo de simulación se requiere introducir el coeficiente de pérdidas de carga hidráulica en función de la apertura, que se puede consultar en especificaciones de fabricantes u oficiales. En el Cuadro 3-3 se muestran algunos coeficientes de pérdidas para válvula completamente abierta (Ref. 3.4).

Cuadro 3-3. Coeficientes de pérdida de carga hidráulica de válvulas completamente abiertas.

TIPO DE VÁLVULA	ILUSTRACIÓN	COEFICIENTE DE PÉRDIDA DE CARGA HIDRÁULICA $K(\theta)$
Compuerta		0.1 a 0.3
Mariposa		0.2 a 0.6
Bola		0.1
Asiento		3 a 10

$$h_v = k(\theta) \frac{8Q^2}{g\pi^2 D^4} \quad (3.5)$$

Donde:

h_v = Pérdida de carga hidráulica por válvula, en m.

$k(\theta)$ = coeficiente de pérdida por válvula, función de la apertura θ , adimensional.

Q = Caudal que circula por la válvula, en m^3/s .

D = Diámetro de la válvula, en m

π = Número 3.1415.

g = Aceleración de la gravedad, en m/s^2 .

3.2.1.4 Calibración del modelo de simulación hidráulica de la red

Después de terminar de introducir todos los elementos y datos de la red de distribución de agua potable al modelo, se realizan las primeras simulaciones para calibrarlo con los resultados observados en campo. En estas primeras corridas se comparan los resultados del modelo contra las mediciones de presión y caudal, efectuadas previamente en la distribución de la red. En caso de que los valores numéricos hidráulicos en el modelo sean diferentes a los obtenidos físicamente en campo, se procede a ajustar las propiedades de las tuberías y nodos, hasta que coincidan dichos valores de presión y caudal.

Los parámetros que más influyen en la calibración de un modelo de simulación hidráulica de una red de distribución son:

- Cota de los nodos.
- Demanda de agua en los nodos de caudal.
- Diámetro de las tuberías.
- Rugosidad de las tuberías.

Otros factores que se pueden considerar para calibrar un modelo de la red son:

- Coeficientes de pérdida de carga hidráulica en válvulas.
- Fugas excesivas de agua.

- Tramos de la red omitidos en el esqueleto del modelo de la red.
- Curvas de equipos de bombeo.

La calibración de un modelo hidráulico de una red de distribución de agua potable es una tarea complicada y laboriosa, que no se contempla dentro de los alcances del libro. Existen técnicas que permiten calibrar los coeficientes de rugosidad o las demandas en forma separada, o bien simultáneamente los dos parámetros, pero requieren mediciones adicionales de campo y se limitan a modelos sencillos. Si el lector está interesado en profundizar más sobre este concepto, puede consultar las publicaciones de *Bhave (ref. 3.5)* y *Walski (ref. 3.6)*.

La experiencia muestra que, en redes complejas de más de 50 tramos o nudos, la calibración del modelo al 100% es muy difícil, debido a la gran cantidad de variables que intervienen. En la práctica, se ha visto que los factores que más afectan las diferencias de resultados entre un modelo y los de las mediciones de campo, son las cotas del terreno en nodos, las curvas de operación de los equipos de bombeo, la altura de los tanques, la profundidad del nivel dinámico de los pozos, los coeficientes de rugosidad, el trazo equivocado de la red, el estado físico de apertura de las válvulas. Por ello, se recomienda primero revisar a fondo que los planos de la red estén actualizados y que el modelo se haya representado adecuadamente, antes de realizar ajustes con otras variables. Luego de verificar el plano con el modelo, se procederá a ajustarlo en el siguiente orden: comenzar con cambios en las líneas de conducción y tuberías principales que transportan el agua en bloque y finalizar con la red secundaria.

Una vez que se realicen los ajustes antes mencionados, el modelo de simulación hidráulica queda calibrado y listo para realizar los análisis para el diseño. A este modelo que reproduce las condiciones físicas e hidráulicas existentes en la red normalmente se le denomina “Modelo Actual o Base”. Como se dijo antes, en el caso de la sectorización de redes durante la etapa del diseño se tendrán dos modelos de simulación actual, uno para la red secundaria conformada por los sectores y, otro, para la red primaria de entrega de agua en bloque.

3.2.2 Análisis y diseño hidráulico de la sectorización de la red

Después de construir los modelos de simulación hidráulica y calibrarlos con el funcionamiento actual de las redes de distribución primaria y secundaria, se procede con el análisis de los sectores del anteproyecto, con el fin de lograr en ellos un diseño de distribución de presiones y caudales que cumpla con las especificaciones vigentes.

Al respecto, la Comisión Nacional del Agua, CONAGUA, establece en su manual de Redes de Distribución (*Ref. 3.7*) que las presiones o cargas disponibles de operación, que se han de obtener en el diseño de la red para la red, deberán ser suficientes para suministrar una cantidad de agua razonable en los pisos más altos de las casas, fábricas y edificios comerciales de no más de 6 pisos. Deberán estar comprendidas entre 1.5 a 4.0 kg/cm² (15 a 40 metros de columna de agua). Para localidades urbanas pequeñas se admite una presión mínima de 1 kg/cm² (10 m.c.a.). La presión máxima (carga estática) admisible no deberá ser mayor a 5 kg/cm² (50 m.c.a.).

La velocidad mínima de escurrimiento se fija para evitar la precipitación de partículas que arrastre el agua. La velocidad máxima será aquella con la cual no deberá ocasionarse erosión en las paredes de las tuberías ni efectos por flujo transitorio. También, en el manual de agua potable de la CONAGUA (*Ref. 3.8*) se establecen los límites de la velocidad del agua dentro de las tuberías, dependiendo de su material; no obstante, de manera general y práctica se acepta una velocidad mínima de 0.3 m/s y una

máxima de 3 m/s. Es muy importante recordar que mientras más altas sean las velocidades del agua en las conducciones, mayores serán las pérdidas por cortante y por lo tanto, mayores serán las cargas hidráulicas de los equipos de bombeo.

3.2.2.1 Análisis y diseño hidráulico de la red secundaria de los sectores

Para lograr un diseño hidráulico de la red secundaria de los sectores propuestos en el anteproyecto de sectorización, es necesario realizar un análisis de cada uno de ellos, partiendo de las condiciones actuales y modificando sus elementos u operación, en función de los resultados que se van obteniendo, hasta que se consiga un esquema de red que sea suficiente para transportar el agua requerida por los usuarios en los niveles de presión permisibles, optimizando la infraestructura existente, sin causar pérdidas de carga excesivas en las tuberías o provocar altas necesidades de carga hidráulica en los equipos de bombeo o incrementos adicionales a las capacidades volumétricas de tanques de regulación del sistema de abastecimiento. El procedimiento que se recomienda aplicar se expone enseguida.

Paso 1) Modelación del aislamiento de sectores con la red existente

A partir del modelo de simulación hidráulica actual o base de la red secundaria, se hace el análisis del aislamiento de los sectores del anteproyecto, cerrando válvulas y/o simulando cortes de tuberías para delimitarlos en dicho modelo. Conviene verificar un sector por vez, apagando o cerrando los nodos que suministran agua (pozos, tanques, rebombes, derivaciones directas de red primaria) a los sectores colindantes y realizando una simulación en estas condiciones para observar que, efectivamente en los nodos y tuberías de los sectores adyacentes al sector analizado en turno no se presentan caudales ni presiones. De esta manera, al terminar se dispondrá de un nuevo modelo de simulación de la red secundaria existente, que incluirá las delimitaciones de los sectores del anteproyecto.

Ejemplo)

En la Figura 3-17 se muestra un ejemplo de una zona de la ciudad de México, donde se han delimitado dos sectores en el modelo de simulación existente de la red secundaria. Se observa que ambos sectores han quedado aislados, ya que en los sectores colindantes a ellos las presiones resultantes del cálculo son iguales a cero. También, se muestra un detalle como ejemplo de las acciones que se fijaron para delimitar los sectores físicamente.

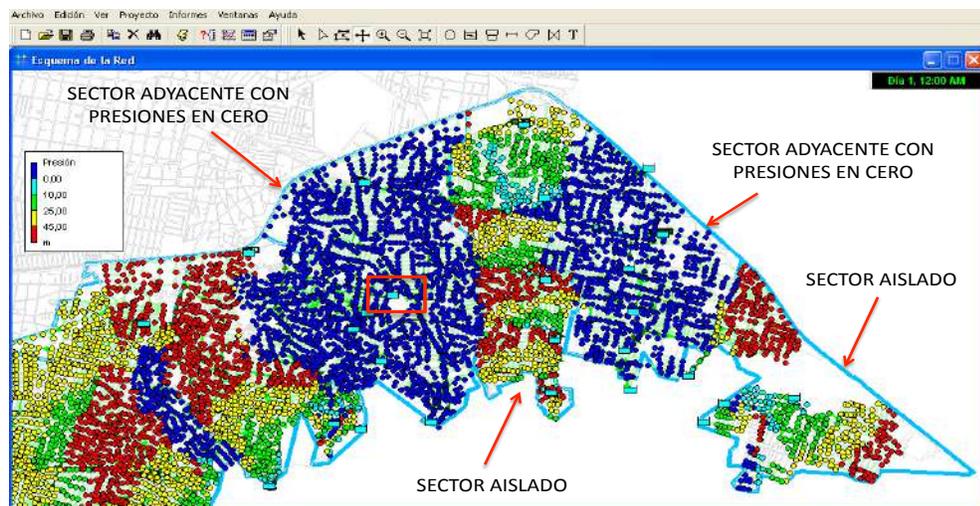


Figura 3.17.a. Verificación del aislamiento de dos sectores en el modelo de simulación.

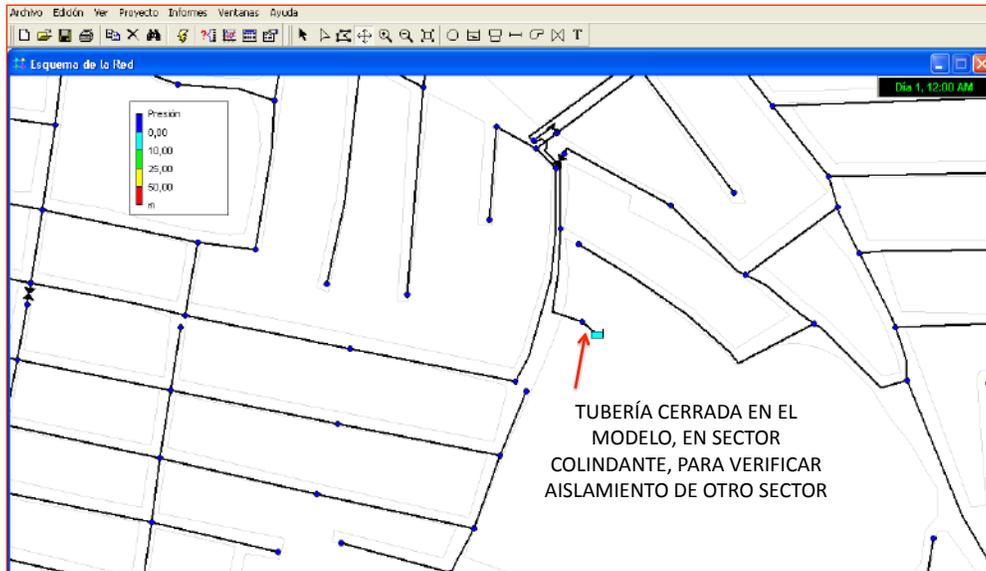


Figura 3.17.b. Detalle en el modelo del cierre de puntos de suministro en sectores adyacentes al sector verificado.

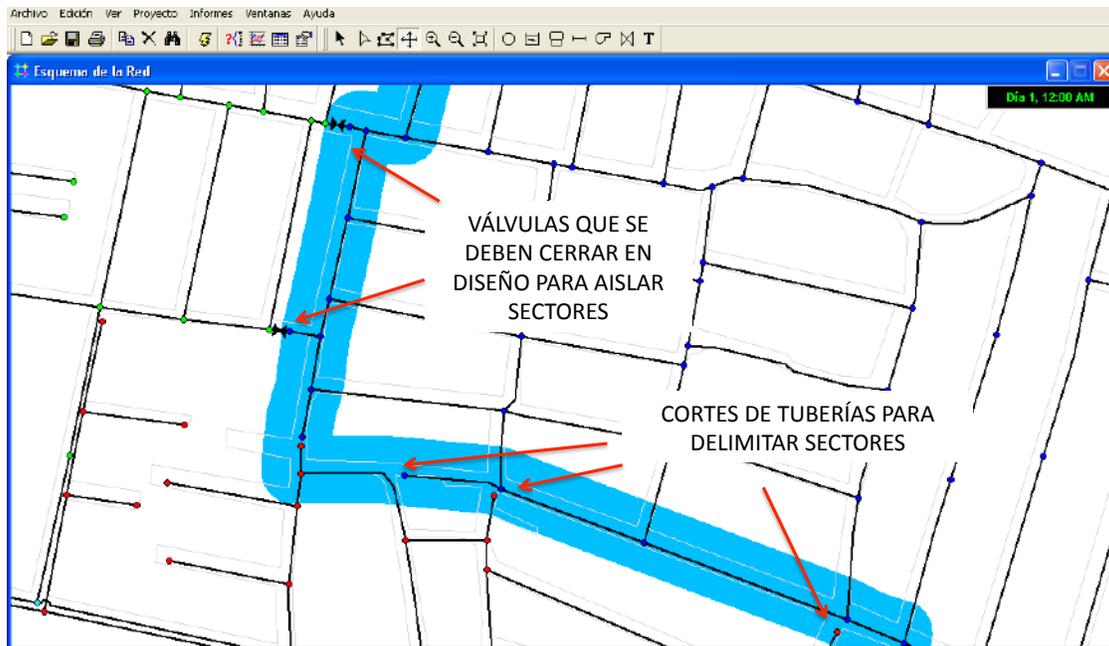


Figura 3.17.c. Detalle de obras o acciones de aislamiento que se analizan en el modelo de simulación.

Figura 3-17. Verificación del aislamiento de dos sectores en el modelo de simulación hidráulica de la zona de la ciudad de México.

Es muy importante que, en toda la fase de análisis hidráulico con el modelo de simulación, todos los cambios propuestos en la red se vayan plasmando de manera simultánea en un plano base de diseño, con la finalidad de facilitar posteriormente la elaboración de los planos ejecutivos de la sectorización.

Paso 2) Modelación de la redistribución de caudales y presiones en sectores

Después de lograr el aislamiento de sectores en el modelo de la red secundaria existente, se procede a realizar los ajustes necesarios en la red de cada sector para redistribuir el agua y presiones dentro de ellos. Se comienza revisando los resultados de una corrida en el modelo que simule los sectores aislados en las condiciones existentes de la red secundaria, con los caudales de demanda máxima horaria en los nodos de consumo. Si se observan presiones superiores a las permisibles, o bien zonas con bajas presiones, entonces se identifican los puntos o elementos que están provocando esta situación en la red; es decir, aquellas tuberías que por su dimensión o ubicación son las causantes de altas pérdidas de carga hidráulica o, por el contrario, que su estado de conexión impide romper la presión del agua, ocasionada por los grandes desniveles dentro del sector. Esta actividad se realiza por prueba y corrección, por lo que la rapidez y efectividad del resultado final depende mucho de la habilidad, experiencia y conocimiento hidráulico del ingeniero que realice la tarea. Sin embargo, la práctica indica que es más importante lograr que la solución tenga una alta factibilidad de implementarse, que obtener la mejor optimización del funcionamiento hidráulico de la red.

Ejemplo)

En la Figura 3-18 se muestran los resultados observados en los modelos de simulación hidráulica de la red secundaria del anteproyecto de sectores de la zona de la ciudad de México, para flujo permanente con caudales de demanda máxima horaria; primero sin cambios en dicha red secundaria y enseguida, modificando la red existente e instalando algunas válvulas de control de presiones, para lograr la redistribución hidráulica dentro de los sectores.

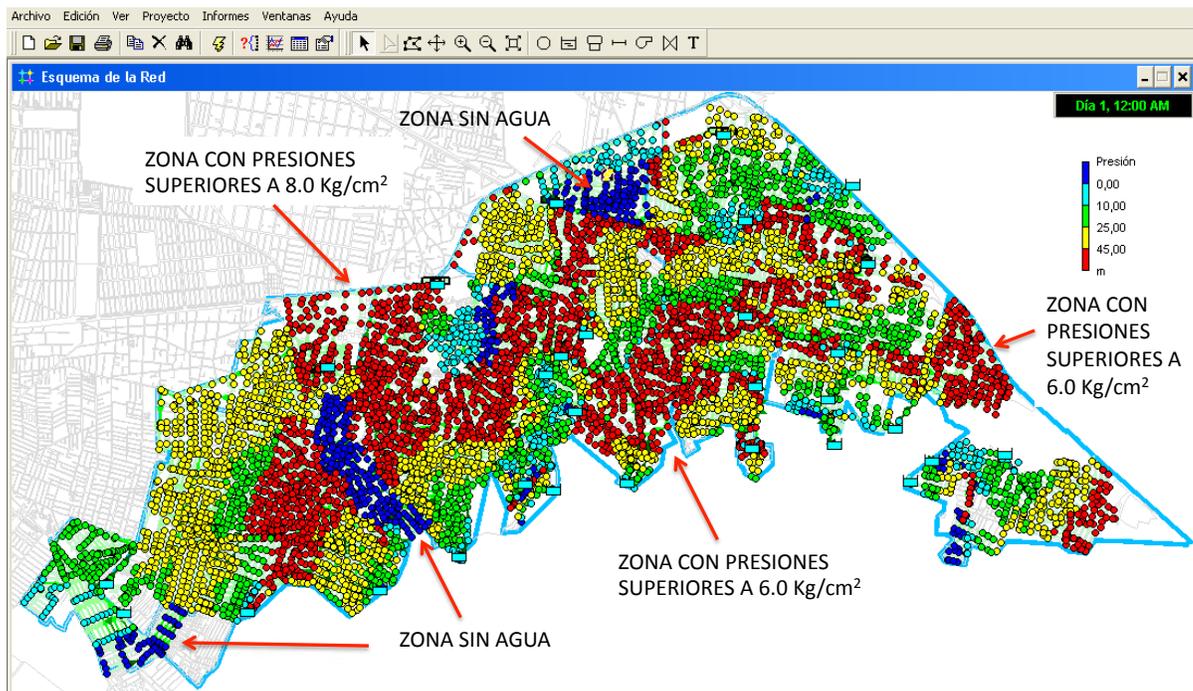


Figura 3.18.a Resultados de la modelación de sectores de anteproyecto sin cambios en la red secundaria de una zona de la ciudad de México, con gasto máximo horario.

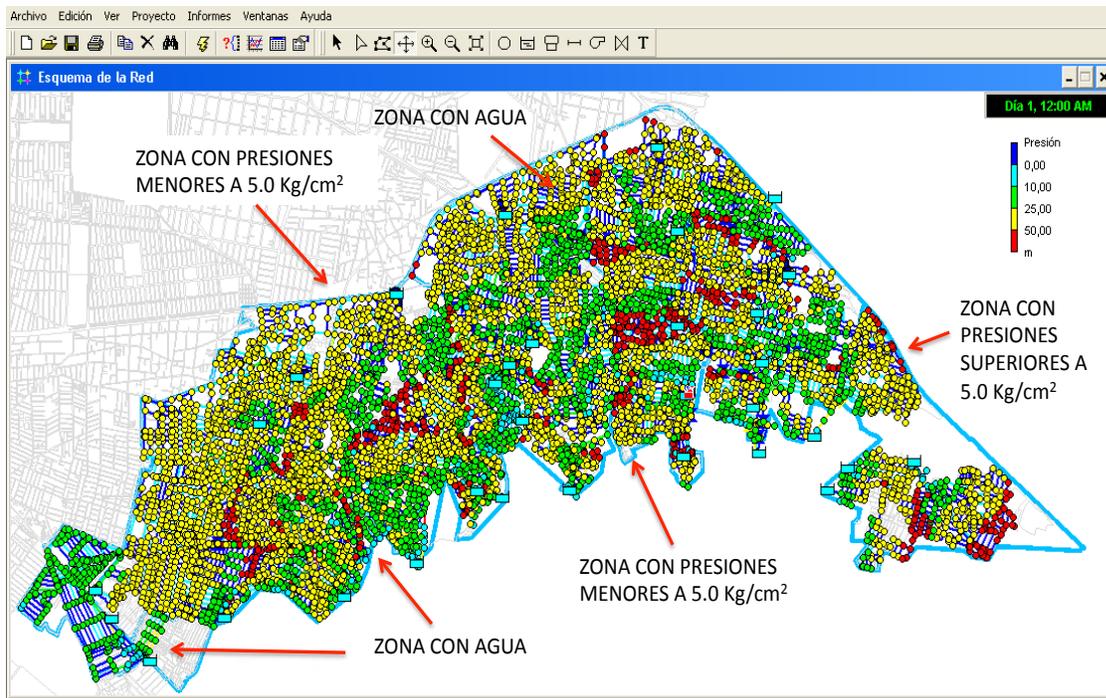


Figura 3.18.b. Resultados de la modelación de sectores de anteproyecto con cambios en la red secundaria de una zona de la ciudad de México, con gasto máximo horario.

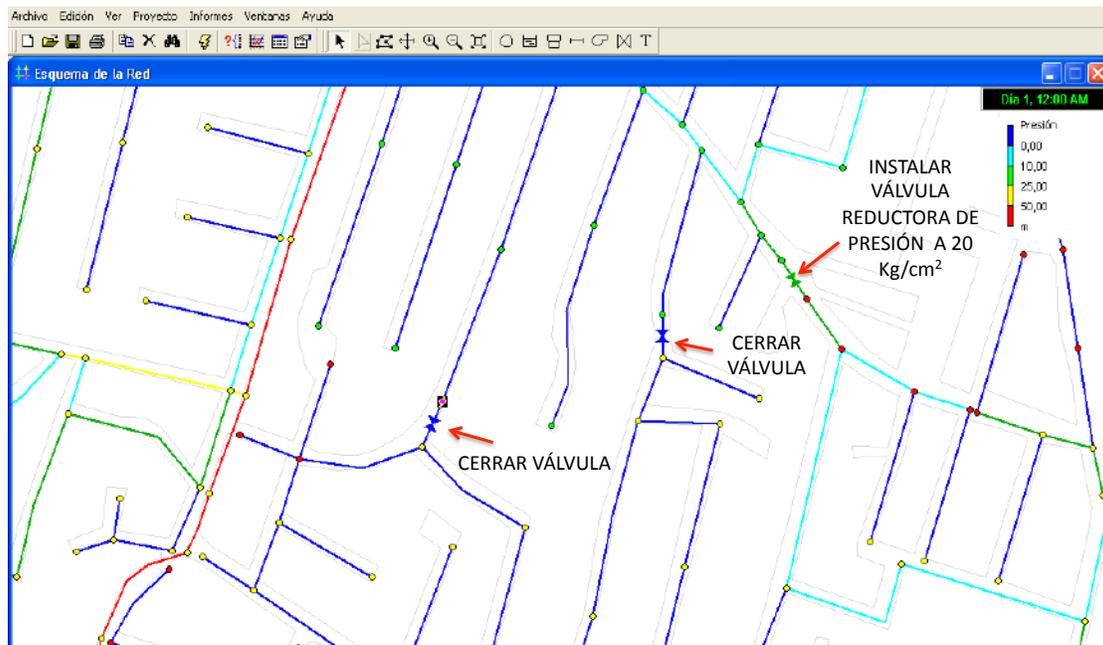


Figura 3.18.c. Detalle de algunos de los cambios en la red interna de los sectores para conseguir la redistribución de caudales y presiones.

Figura 3-18. Resultados de la modelación de sectores de anteproyecto en la red secundaria de una zona de la ciudad de México.

Después de analizar todos los sectores del proyecto de la red de abastecimiento de agua potable, se genera una tabla con todos los cambios propuestos en la infraestructura: cortes, cambios de tuberías,

válvulas reductoras, uniones, etc. Esta información, posteriormente, se utilizará para calcular las cantidades de obra y elaborar los planos de diseño.

Por último, se recomienda realizar corridas adicionales, con caudales de demanda mínimos para observar el comportamiento de la red de sectores en horarios nocturnos y prevenir la instalación de controles complementarios para reducir los volúmenes de fugas en la red secundaria de los sectores.

3.2.2.2 Análisis y diseño hidráulico de la red primaria de los sectores

Después de que se han diseñado internamente los sectores, se realiza el análisis y simulación hidráulica de las líneas de conducción de la red primaria en flujo permanente, para redistribuir los caudales asignados a cada sector en el anteproyecto de sectorización y confirmados en su diseño de red secundaria.

Este proceso del diseño hidráulico de la red primaria se realiza de manera sistemática e interactiva, atendiendo al procedimiento siguiente:

Paso 1) Modelación de caudales de diseño con red primaria existente

Antes de comenzar con el análisis de la red primaria en el modelo de simulación hidráulica, se elabora su diagrama unifilar, indicando los caudales de diseño que deben bombear los equipos, suministrarse a los tanques, circular por las tuberías y derivarse directamente a red secundaria. Además de verificar la continuidad del flujo de agua, la finalidad de esta tarea es tener un esquema completo de la hidráulica de la red primaria que debe alcanzarse en el diseño del suministro del agua a los sectores.

Ejemplo)

En la Figura 3-19 se muestra el diagrama unifilar de la distribución de caudales de diseño de la red primaria de una zona de la ciudad de México, donde se aprecian los valores de caudal máximo diario que deben ser transportados por las tuberías (color azul), los que se inyectan de los pozos a la red primaria (color verde) y los que se derivan hacia los tanques o rebombes y de ellos a la red (color rojo); en este último caso los tanques deberán realizar la regulación del gasto máximo horario hacia la red de los sectores.

Después de elaborar el diagrama unifilar, se realizan cambios en los nodos de consumo en el modelo de la red actual o base, utilizando los valores de caudales de demanda máxima diaria de diseño. En seguida, se hacen corridas en la computadora para observar si en las condiciones actuales de construcción y operación de la red primaria es posible transportar dichos caudales o es insuficiente y requiere adecuaciones.

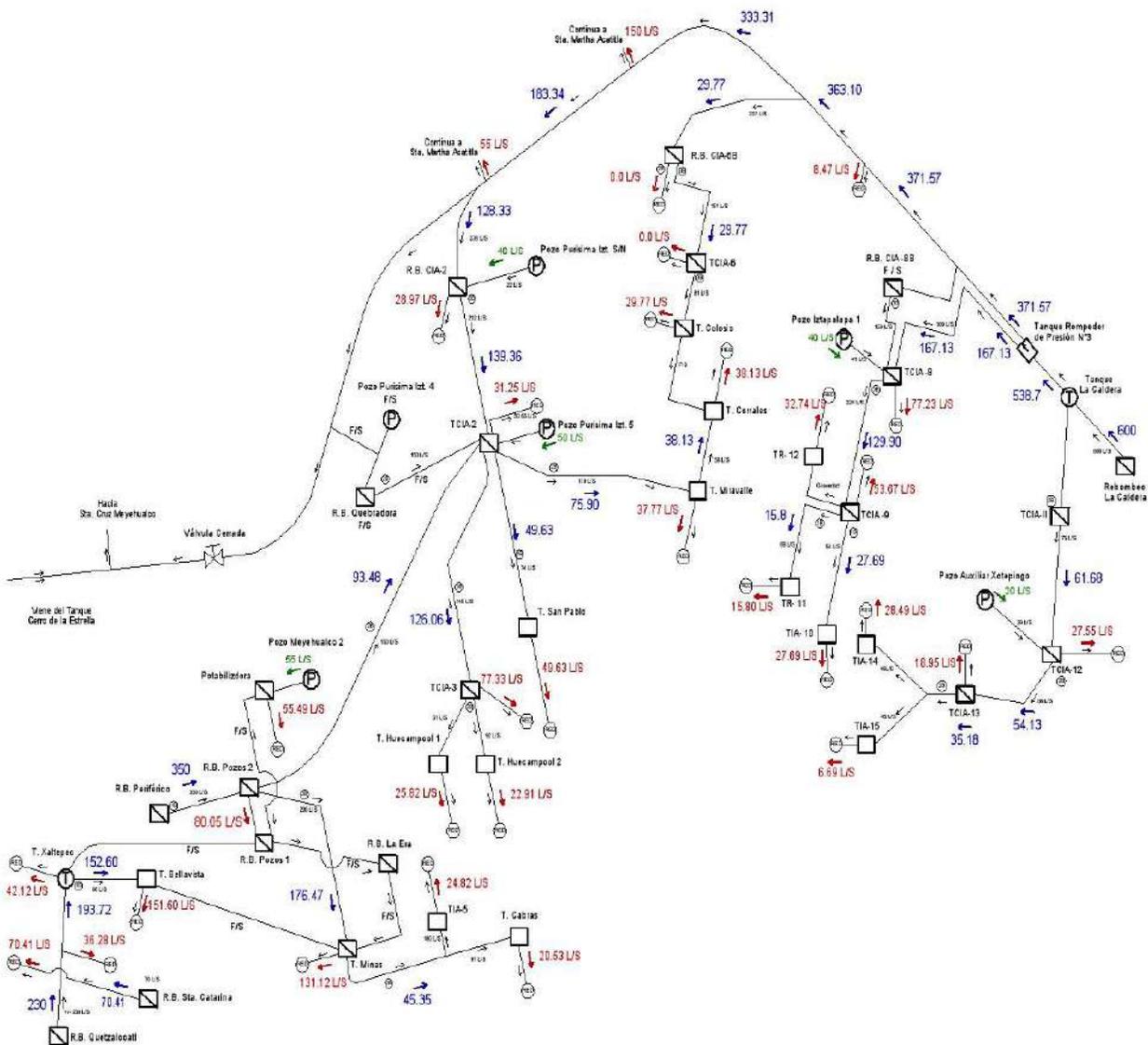


Figura 3-19. Ejemplo de diagrama unifilar de la red primaria de una zona de la ciudad de México, con sus valores de caudales máximos diarios de diseño.

Ejemplo)

En la Figura 3-20 se presenta el resultado de la corrida en el modelo de la red primaria existente con los gastos de diseño, para el ejemplo de la zona de la ciudad de México; se observa que en la red los valores de caudal de diseño, determinados en el diagrama unifilar, no corresponden con los del modelo de simulación, lo que quiere decir que hace falta adecuar la red primaria, principalmente con cambios en: regulación de válvulas, funcionamiento de equipos de bombeo, diámetros y reconexiones de tuberías.

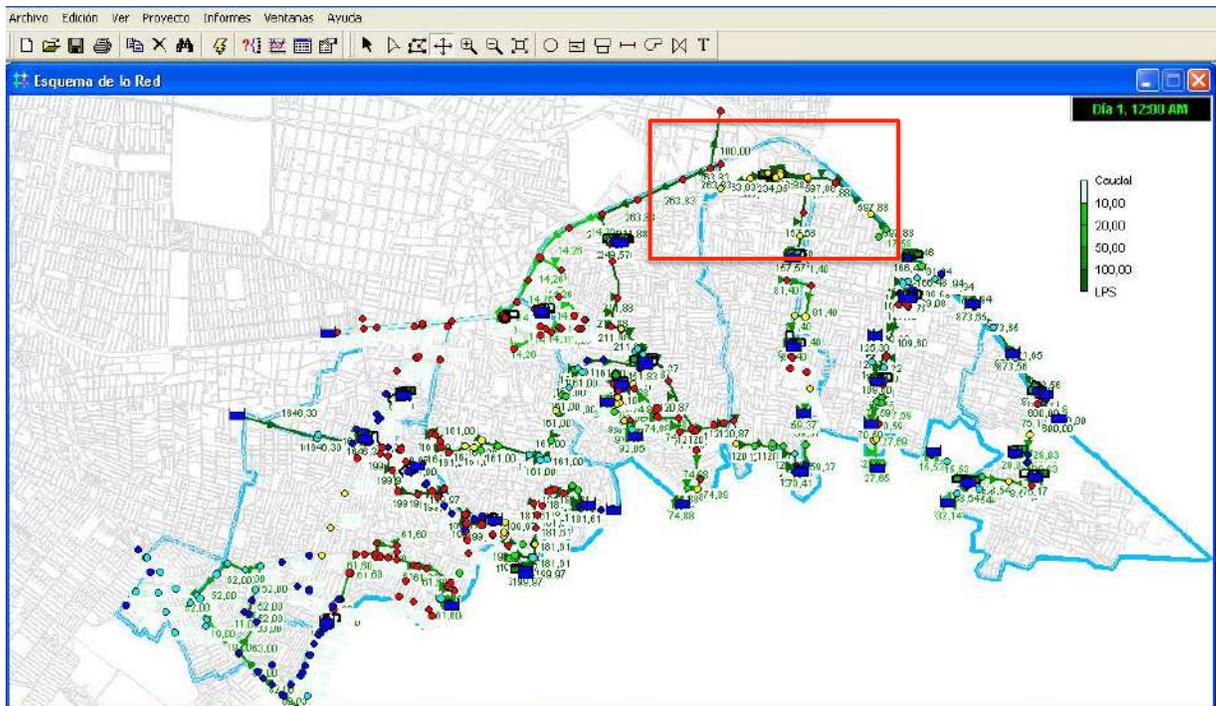


Figura 3.20.a. Vista general de los resultados de la simulación de la red primaria existente con los caudales de diseño en una zona de la ciudad de México.

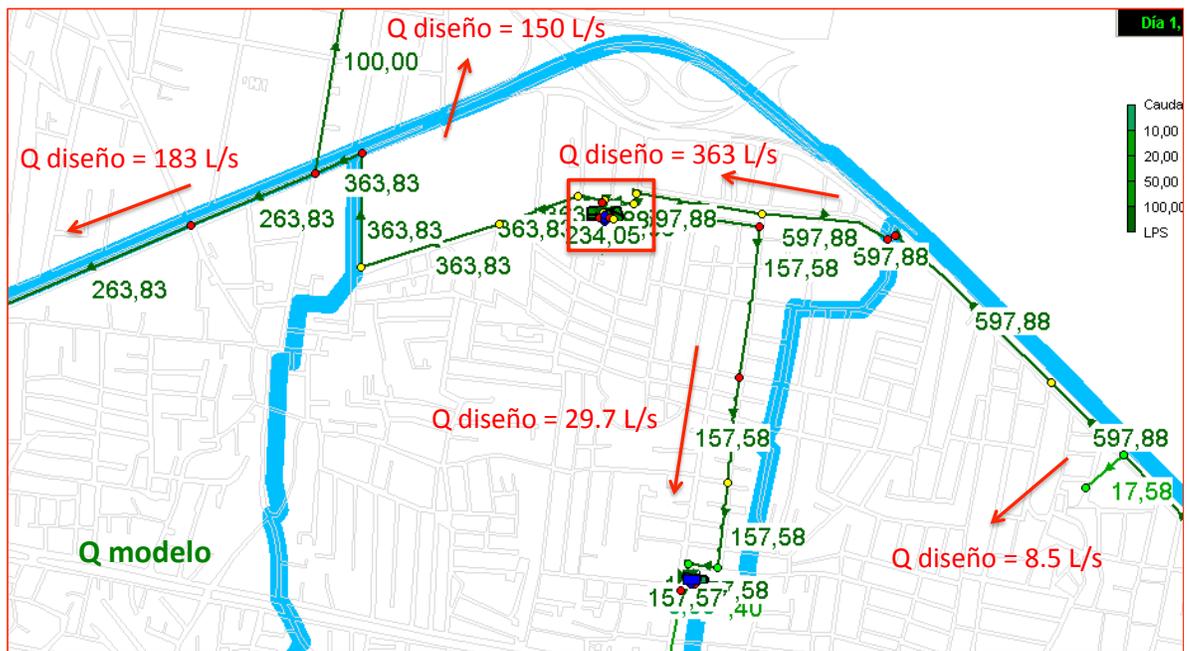


Figura 3.20.b. Detalle de los resultados de la simulación de la red primaria existente con los caudales de diseño en una zona de la ciudad de México.

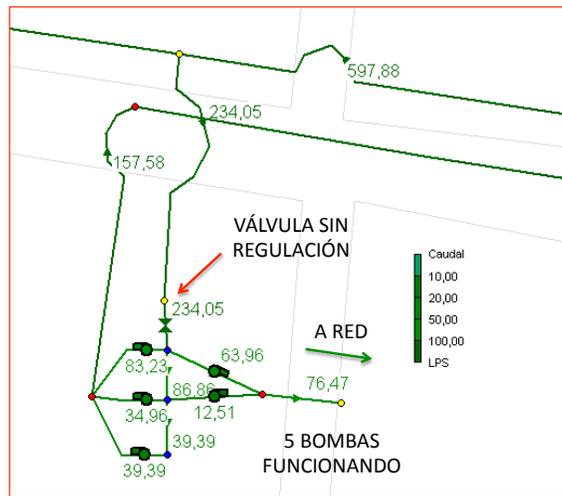


Figura 3.20.c. Detalle del estado de operación de la red primaria existente con los caudales de diseño en una zona de la ciudad de México.

Figura 3-20. Resultados de la simulación de la red primaria existente con los caudales de diseño en una zona de la ciudad de México.

Paso 2) Modelación de caudales de diseño con cambios en la red primaria

Al igual que en el análisis de red secundaria de sectores, las adecuaciones o cambios en los elementos y reglas de operación de la red primaria se realizan mediante prueba y corrección en un proceso iterativo, hasta que se cumpla con las especificaciones permisibles y resulten los caudales de diseño establecidos en el diagrama unifilar respectivo.

Ejemplo)

En la Figura 3-21 se presentan los resultados finales de la zona de la ciudad de México, con los cambios realizados al funcionamiento e infraestructura de la red primaria; donde se observa que se han establecido los caudales de diseño hidráulico en franca correspondencia entre el modelo y su diagrama unifilar.

El diseño y la selección final de equipos de bombeo en condiciones de red sectorizada, se realiza aplicando un sencillo cálculo y eligiendo el equipo comercial de entre la amplia gama de fabricantes, marcas y modelos disponibles en el mercado. Todos los equipos de bombeo cuentan con su gráfica de la curva característica de su operación, donde se relaciona el caudal con la carga dinámica, eficiencia y potencia. La elección de equipo de bombeo comercial será tal que la carga dinámica y el caudal de operación arrojado por el modelo de simulación hidráulica se presenten en el punto de eficiencia más alto, para que su rendimiento sea óptimo y el consumo de energía mínimo.

También, del análisis de la red primaria de suministro de agua a los sectores se genera la información sobre todos los cambios propuestos en la infraestructura y las reglas de operación de equipos y válvulas. Esta información se utilizará posteriormente para completar el cálculo de las cantidades de obra y elaborar los planos de diseño.

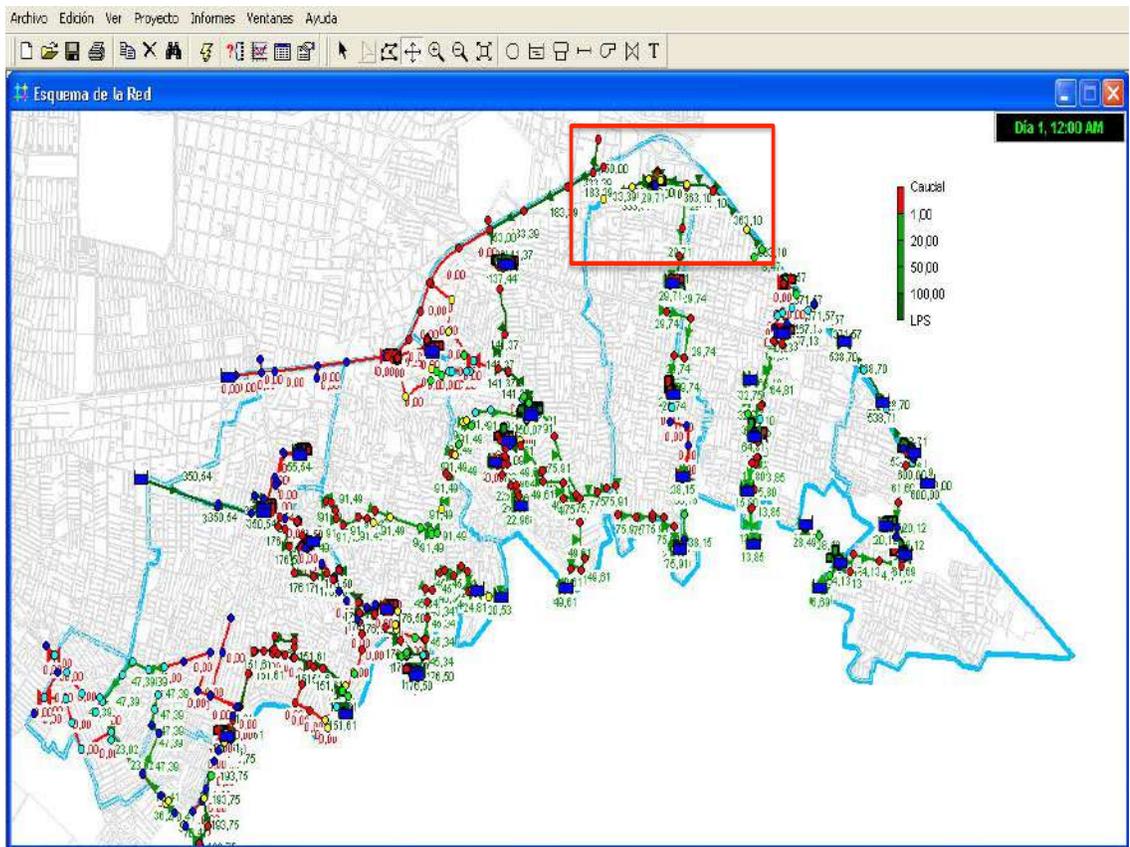


Figura 3.21.a. Vista general de resultados observados en el modelo con el diseño final de la red primaria de la zona de la ciudad de México.

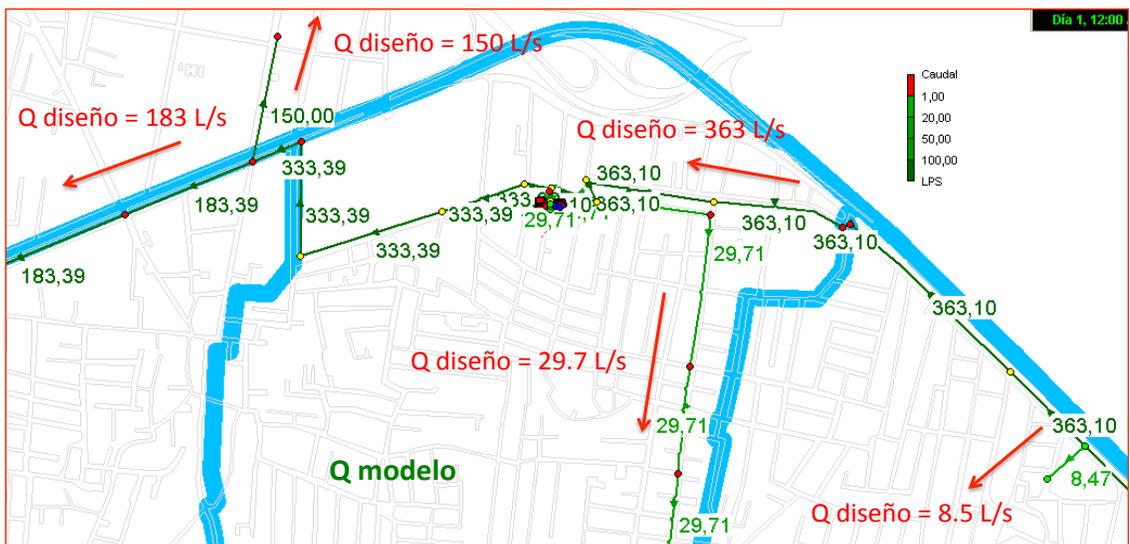


Figura 3.21.b. Detalle de resultados observados en el modelo con el diseño final de la red primaria de la zona de la ciudad de México.

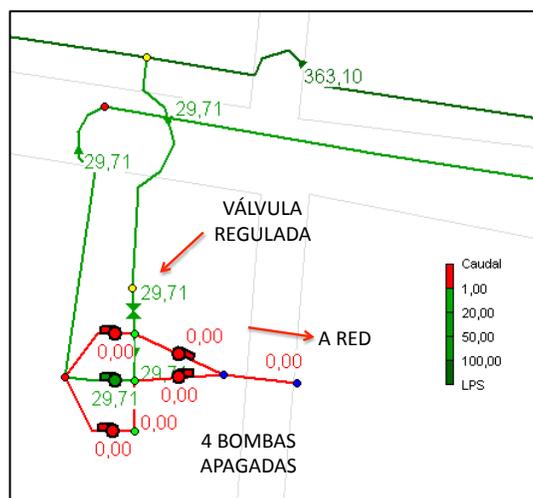


Figura 3.21.c. Detalle de algunos de los cambios en los elementos y funcionamiento hidráulico final de la red primaria de la zona de la ciudad de México.

Figura 3-21. Resultados observados en el modelo con el diseño final de la red primaria de la zona de la ciudad de México.

3.2.2.3 Análisis y diseño hidráulico en período extendido de la red primaria acoplada con la red secundaria de sectores

Aunque no es necesario para el diseño, sí es recomendable que se realice un modelo que acople la red primaria de suministro de agua en bloque con la red secundaria de los sectores, para la solución final del proyecto hidráulico de la sectorización de la red de abastecimiento de agua potable. Este modelo de simulación integrado es muy útil para revisar el funcionamiento general de la red sectorizada de proyecto en condiciones de operación regular; se pueden evaluar las capacidades volumétricas de los tanques de regulación, los cambios de eficiencia de los equipos de bombeo y el estado de presiones en las tuberías, ante las variaciones de demanda de agua horaria.

La conformación de este modelo de simulación en períodos extendidos acoplado, es complicada y laboriosa puesto que, dependiendo de la estructura interna del *software* y de sus algoritmos de solución, es muy probable que el modelo entre en conflicto y no converja hacia la solución si no se le asignan correctamente varias propiedades de sus elementos; por ejemplo: en muchas ocasiones la corrida del modelo falla porque se vacían los tanques o los equipos de bombeo no pueden suministrar el caudal o la carga preasignada en los nodos de consume o en válvulas de control automático. Además, es necesario introducir al modelo las curvas de variación horaria de la demanda de agua y los datos de las capacidades de tanques de regulación, lo cual implica la recolección de información adicional. Asimismo, la calibración del modelo del modelo de simulación conlleva a análisis y mediciones más extensivos y rigurosos.

De cualquier manera, si se consigue elaborar el modelo de simulación hidráulica del proyecto de sectorización en período extendido, incluyendo en el mismo a la red primaria y secundaria, entonces se recomienda complementar el diseño final con las siguientes evaluaciones del comportamiento de la red en variaciones horarias:

- Análisis de funcionamiento hidráulico de tanques de regulación y rebombes.
- Evaluación del consumo de energía eléctrica en equipos de bombeo.
- Variación del volumen de pérdidas por fugas ante los cambios de presión en la red y demanda de usuarios.
- Análisis del cierre de sectores durante su puesta en operación y pruebas de aislamiento.

Con estos análisis se prevendrán, por un lado, las adecuaciones en el diseño de capacidades de tanques y cárcamos de bombeo, variadores de velocidad de bombas, controladores de presión en horas nocturnas y, por otro, en la planeación y programación de acciones de construcción y aislamiento de los sectores para evitar afectaciones a usuarios en su servicio de agua.

Independientemente de que se decida conformar, o no, el modelo en período extendido es recomendable de todas maneras hacer el acoplamiento de los modelos de diseño en flujo permanente de red secundaria y primaria en uno solo, ya que en las etapas posteriores de construcción e implementación de sectores será de gran utilidad.

3.3 DISEÑO DE DISTRITOS HIDROMÉTRICOS

Los distritos hidrométricos (DH) son áreas de la red que se aíslan hidráulicamente de manera temporal, para realizar pruebas de suministro, consumo y fugas de agua. En una red sectorizada, los distritos hidrométricos están confinados dentro de los sectores, de tal forma que en un sector pueden quedar alojados uno o varios DH a la vez. La finalidad primordial de los distritos hidrométricos es apoyar la gestión de fugas de la red de agua potable, principalmente para obtener evaluaciones de los caudales potenciales de fugas, antes y después de acciones de reducción de pérdidas.

Cuando se conforma un distrito hidrométrico, el cierre de válvulas para su aislamiento puede ocasionar que las áreas adyacentes de la red de distribución sean alteradas hidráulicamente. Se pueden presentar disminuciones de presión y de caudal, dejando incluso sin servicio de agua a algunos usuarios de la red.

En estas circunstancias, es indispensable que se elabore un diseño de los distritos hidrométricos, antes de ejecutar las pruebas y la construcción y equipamiento de la estación de aforo, con el fin de disminuir al máximo las afectaciones y prevenir las adecuaciones constructivas correspondientes.

El diseño de los distritos hidrométricos se soporta con un modelo de simulación hidráulica de la red, para analizar su operación conjunta, optimizar su ubicación, minimizar el número de válvulas de cierre, elegir la tubería de suministro y garantizar su funcionamiento hidráulico. Para realizar esta tarea aplica el procedimiento que se describe a continuación:

Paso a) Ubicación de DHs en la red de sectores y en el modelo de simulación hidráulica

En el plano de la red se exploran las posibilidades de ubicar distritos hidrométricos, bajo las reglas y recomendaciones siguientes (*Ref. 3.9*):

- El tamaño del distrito debe tener entre 500 y 3,000 conexiones, o entre 5 y 25 kilómetros de longitud de red.

- En zonas donde se sospeche que hay una alta incidencia de fugas, el distrito hidrométrico debe tender a ser de menor tamaño.
- Los límites del DH deben coincidir con divisiones urbanas naturales, como son líneas de ferrocarril, carreteras, avenidas, ríos, canales, playas, lagos, etc. También, se consideran importantes las fronteras hidráulicas de la red para delimitar el DH.
- Al quedar aislado el DH, la red interna y externa debe tener presiones mínimas de 1 kg/cm², aún en horas de máximo consumo.
- Se debe disponer solamente una tubería de suministro al DH. No obstante, si no se logra cumplir con esta restricción, entonces se eligen dos o tres suministros como máximo. En casos extraordinarios es posible que se esté obligado a elegir una tubería de salida de agua del DH. No hay que olvidar que en cada uno de estos puntos de suministro o salida de agua representa una estación de aforo, que implica construcción, tiempo y costo adicionales.
- El aislamiento del DH debe ser ejecutado con el mínimo de cortes de tuberías o cierres de válvulas.

Ejemplo)

Se presenta el caso de una ciudad, donde se definieron varios distritos hidrométricos dentro de seis sectores de la red de distribución de agua potable, un ejemplo de dos DHs ubicados dentro del sector SH-2, se muestra en la Figura 3-22.



Figura 3-22. Vista de dos DHs ubicados dentro del sector SH-2 de la ciudad del ejemplo.

Los detalles de los distritos DH-1 y DH-2, conformados en el modelo de simulación hidráulica, se presentan en la Figura 3-23, donde se han señalado sus límites, las válvulas a cerrar y cortes de tuberías para su aislamiento, así como la posición de la estación de aforo.



Figura 3-23. Detalles de los distritos DH-1 y DH-2 conformados en el modelo de simulación hidráulica.

Paso b) Simulación del funcionamiento hidráulico de los distritos hidrométricos

Después de ubicar los distritos hidrométricos, es necesario que se simulen en el modelo hidráulico para investigar si con los aislamientos propuestos se afecta el servicio de agua a los alrededores y dentro de los propios distritos hidrométricos.

Ejemplo)

En la ciudad del ejemplo los resultados del análisis con el modelo hidráulico indican que el aislamiento del DH-1 no causa alteraciones importantes en las presiones y caudales de la zona (Figura 3-24).



Figura 3-24. Análisis hidráulico del DH-1, sin y con aislamiento físico, respectivamente.

En cambio, al aislar el DH-2 si se suspende el servicio de agua en algunas zonas adyacentes y las presiones disminuyen en forma considerable, como se muestra en la Figura 3-25.

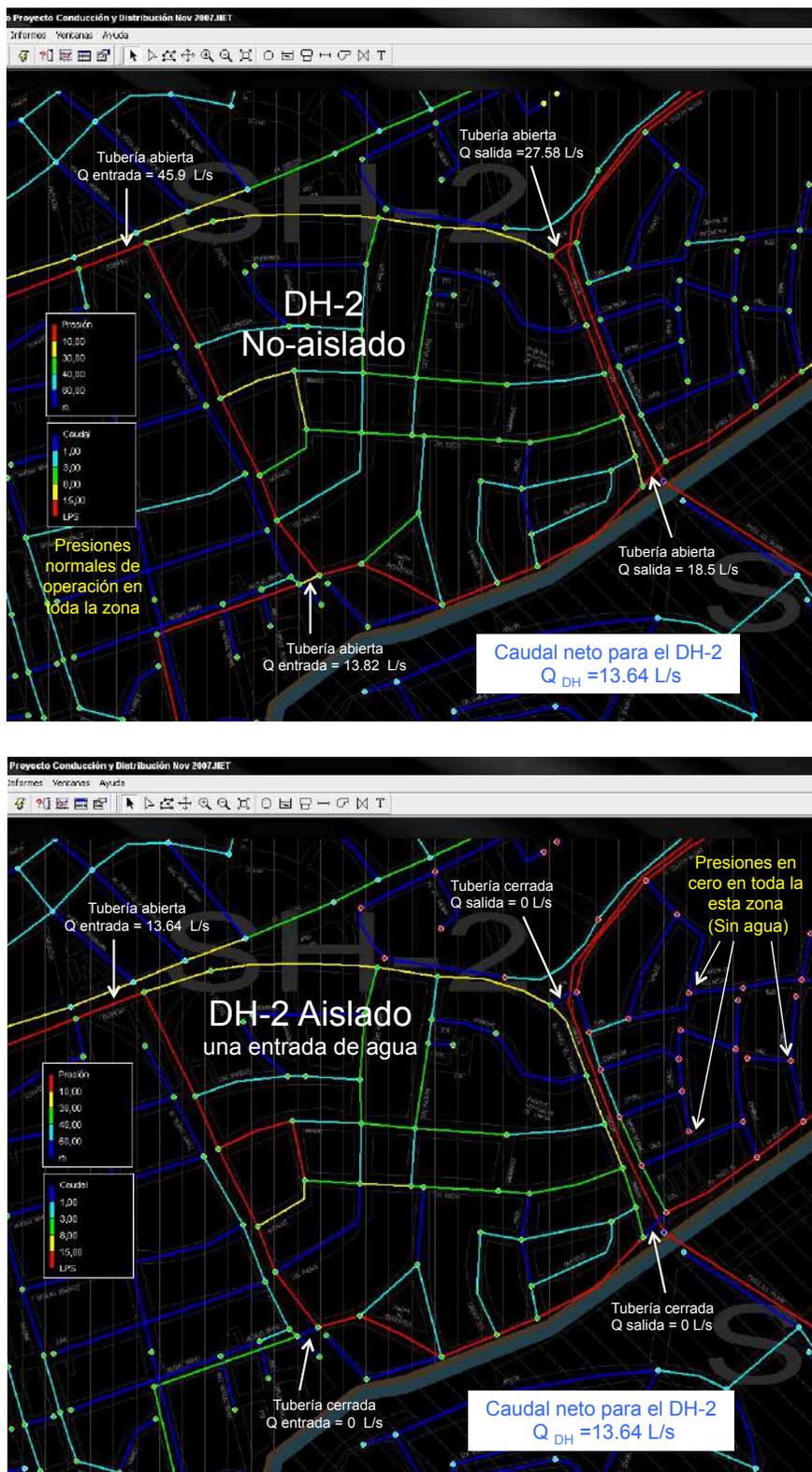


Figura 3-25. Análisis hidráulico del DH-2, sin y con aislamiento físico, respectivamente.

Paso c) Ajustes al diseño hidráulico de los distritos hidrométricos

Si sucede un problema como en el caso anterior del DH-2, en donde se deja sin servicio de agua a otros usuarios fuera del distrito cuando se aísla de la red, se debe entonces realizar una modificación al diseño hidráulico del DH, probando otras entradas de agua o bien dejar una salida de agua para suministrar agua a la otra zona de la red. Es importante recordar que en cada salida y entrada de agua al DH implica costos al proyecto ya que se debe instalar una estación de aforo, para poder realizar las pruebas posteriores.

Ejemplo)

En el caso del ejemplo, una solución viable para el DH-2 es dejar salir el agua por alguna de las tuberías que conectan al distrito con el resto de la red, como se muestra en la Figura 3-26.

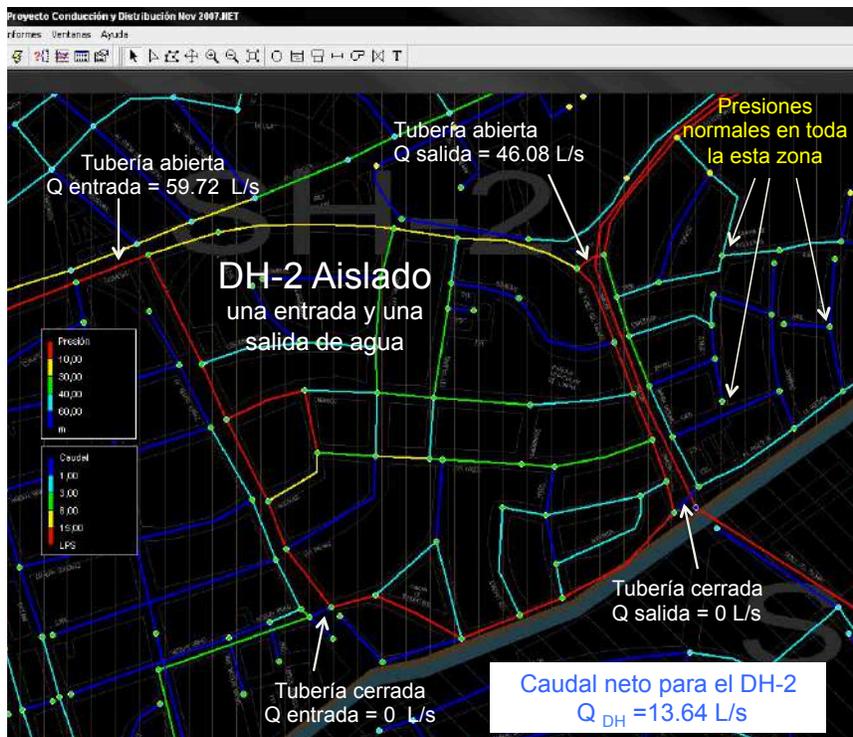


Figura 3-26. Análisis hidráulico del DH-2 de la ciudad del ejemplo, aislado pero con una entrada y una salida de agua.

Como se observa en la Figura 3-26, con la solución de agregar una estación de salida de caudal en el DH-2, las presiones se normalizan y no se afecta el funcionamiento de otras áreas circundantes de la red de distribución de agua potable.

Una vez que se concluya con la ubicación y análisis de todos distritos hidrométricos, se realiza el diseño ejecutivo de las obras de aislamiento y estaciones de aforo y se dibuja en un plano los DHs, con los detalles constructivos y cantidades de obra, señalando las válvulas que deben cerrarse durante las pruebas para lograr los aislamientos, tal como se verá en el siguiente capítulo.

3.4 PLANOS CONSTRUCTIVOS, ESPECIFICACIONES, MEMORIA Y PRESUPUESTO DE PROYECTO

Todo diseño ejecutivo de las obras del proyecto de abastecimiento de agua potable debe ser dibujado en planos. Generalmente, las obras de captación, regulación, potabilizadora, equipo de desinfección, equipamiento electromecánico, bombas y casetas, se dibujan en planos que contienen vistas en plantas, cortes y detalles constructivos. Los planos de líneas de conducción se presentan en perfil y planta a escalas diferentes para la distancia y elevación. El caso del diseño de la red se presenta solamente con vista en planta, en varios planos en forma de mosaicos a escala 1:2000, con un plano anexo del diseño de los cruceros. Se anotan las cantidades de obra en todos los casos y las principales especificaciones de diseño.

Aparte de los planos, se elabora una memoria de cálculo del proyecto, con los cálculos y parámetros de diseño establecidos. Se agrega un catálogo de conceptos del detalle de las cantidades de obra y su presupuesto base de inversión.

En seguida, se presentan los criterios para elaborar los planos, memoria de cálculo, catálogo de conceptos y presupuesto base para el diseño ejecutivo de un proyecto de sectorización de la red de agua potable.

3.4.1 Elaboración de planos constructivos de sectores y distritos hidrométricos

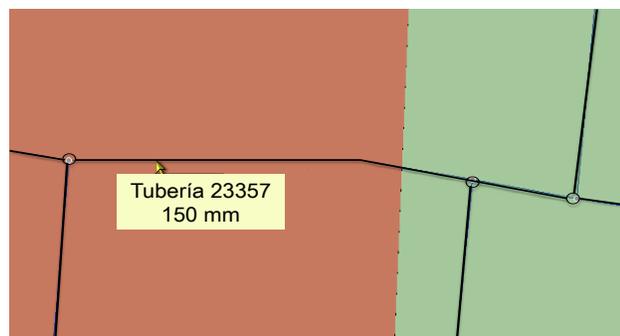
Para facilitar el dibujo de los planos ejecutivos del diseño hidráulico del proyecto de sectorización es recomendable etiquetar las modificaciones que se vayan proponiendo en la infraestructura, durante el análisis de la red con el modelo de simulación hidráulica.

Los modelos de simulación hidráulica de sistemas de agua potable de ciudades completas normalmente contienen mucha información (tramos de tuberías, nodos e infraestructura mayor) y si, adicionalmente a ese modelo se le colocan muchas etiquetas de todas las modificaciones propuestas, se obtendrá un modelo con muchos datos. Por ello, se recomienda que se hagan etiquetas cortas pero claras en su contenido, así como utilizar una nomenclatura en forma de clave. Las etiquetas con nomenclaturas cortas evitarán que se sature lo mínimo posible el espacio visual de tu modelo, sin que se deje anotar claramente cada modificación a ejecutar en el proyecto de la sectorización.

Ejemplo)

En la Figura 3-27 se presentan ejemplos típicos de la manera de etiquetar la red sectorizada en el modelo de simulación hidráulica.

Red actual



Red modificada en el diseño

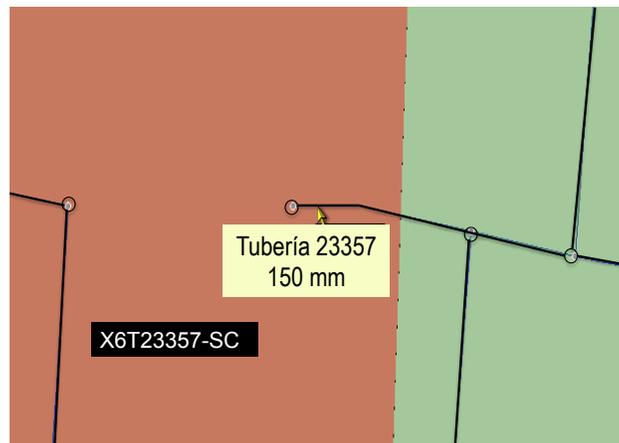
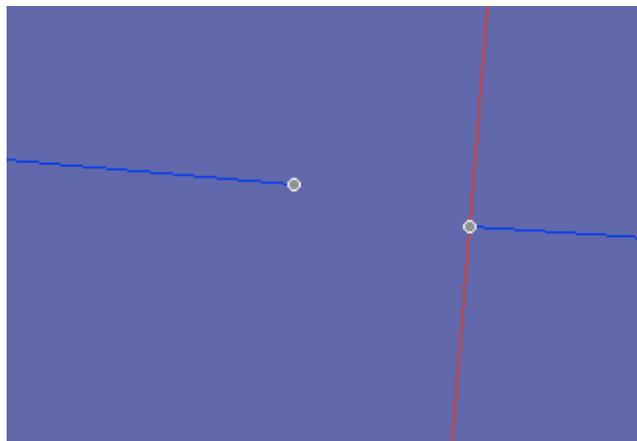


Figura 3.27.a. Etiqueta: X6T23357-SC Descripción: Corte de 6" en Tubería No. 23357 del Sector hidráulico Cañitos.

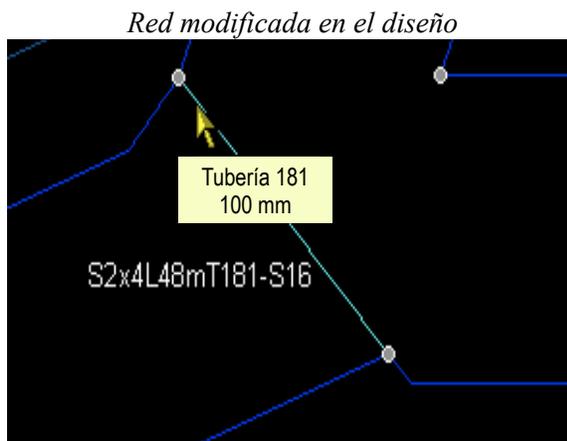
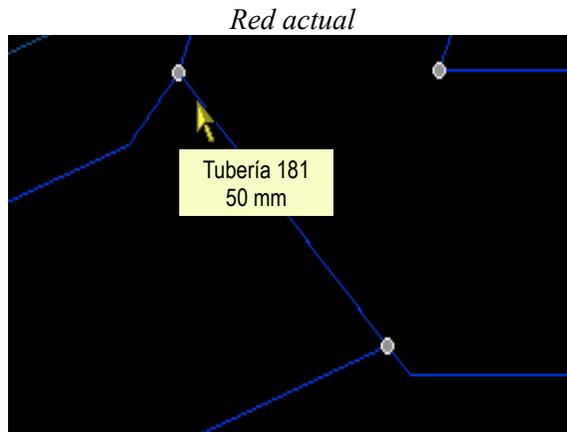
Red Actual



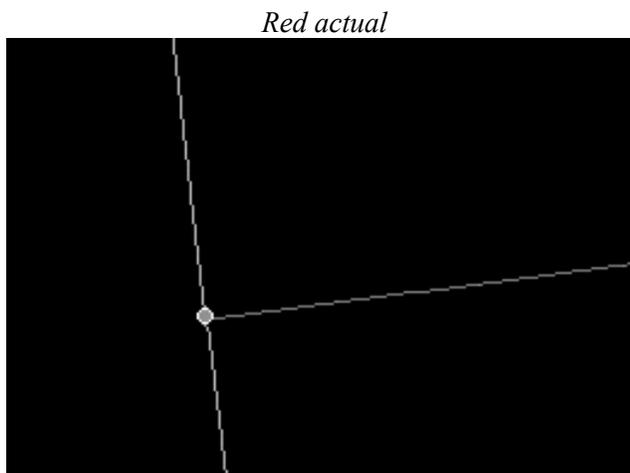
Red modificada en el diseño



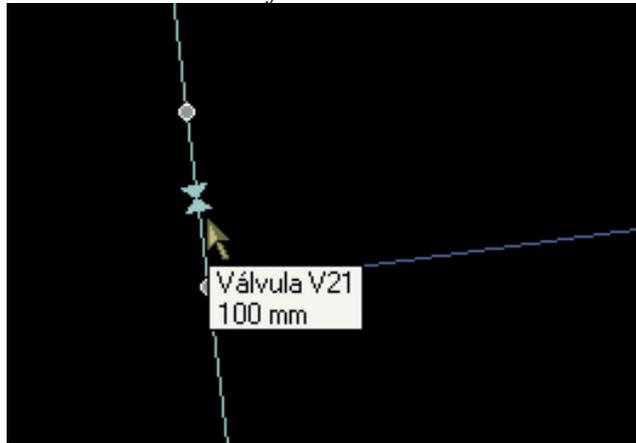
Figura 3.27.b. Etiqueta: C3a8L9.0mT106-S10 Descripción: Conexión de 3" a 8" con longitud de 9.0m, Tubería No.106 del Sector hidráulico 10.



*Figura 3.27.c. Etiqueta: **S2x4L48mT181-S16** Descripción: Sustituir tubería de 2" por tubería de 4" con longitud de 48.0m, Tubería No.181 del Sector hidráulico 16.*



Red modificada en el diseño



*Figura 3.27.d. Etiqueta: **VRP-V21-22mca-SLB** Descripción: Colocar Válvula Reductora de Presión No. V21 calibrada a 22mca del Sector Hidráulico La Bola.*

Figura 3-27. Ejemplos típicos de etiquetado recomendado en el diseño de sectores de la red durante la fase de análisis con el modelo hidráulico, para facilitar elaboración de planos.

Todas estas modificaciones obtenidas con el análisis y diseño hidráulico en el modelo de simulación se dibujarán posteriormente y serán parte de los planos ejecutivos de la red sectorizada de proyecto.

Los planos que se elaboran para representar el diseño ejecutivo de un proyecto de sectorización son los siguientes:

a) Plano general del proyecto de sectorización de la red

El plano general del proyecto de la sectorización de la red de distribución sirve para visualizar la solución global de la red sectorizada de diseño, debe incluir la siguiente información:

- Datos generales de la empresa de agua y clave del plano.
- Simbología y localización general.
- Esquema los sectores y distritos diseñados.
- Tipo y ubicación de la infraestructura principal de cada sector:
 - Obra de captación.
 - Tanques de regularización.
 - Rebombeos.
- Red primaria del sistema de abastecimiento (tuberías de conducción entre fuentes de abastecimiento y obras de regularización, rebombeos y puntos de suministro a la red de distribución secundaria).
- Datos de diseño de cada sector.
 - Cantidad de conexiones domésticas, índice de hacinamiento, habitantes servidos, dotación y caudales de diseño medio, máximo diario y máximo horario.
 - Capacidad de almacenamiento de los tanques de regularización.
 - Punto de operación de Carga-Gasto (H-Q) de los equipos de bombeo.

Debido a la escala de este plano, no es conveniente incluir el dibujo de la red secundaria de distribución. Dicha información será más útil y fácil de visualizar en los planos ejecutivos individuales de cada sector.

Ejemplo)

En la Figura 3-28 se muestra un ejemplo de un plano general de un proyecto de sectorización de red, con los detalles que contiene.

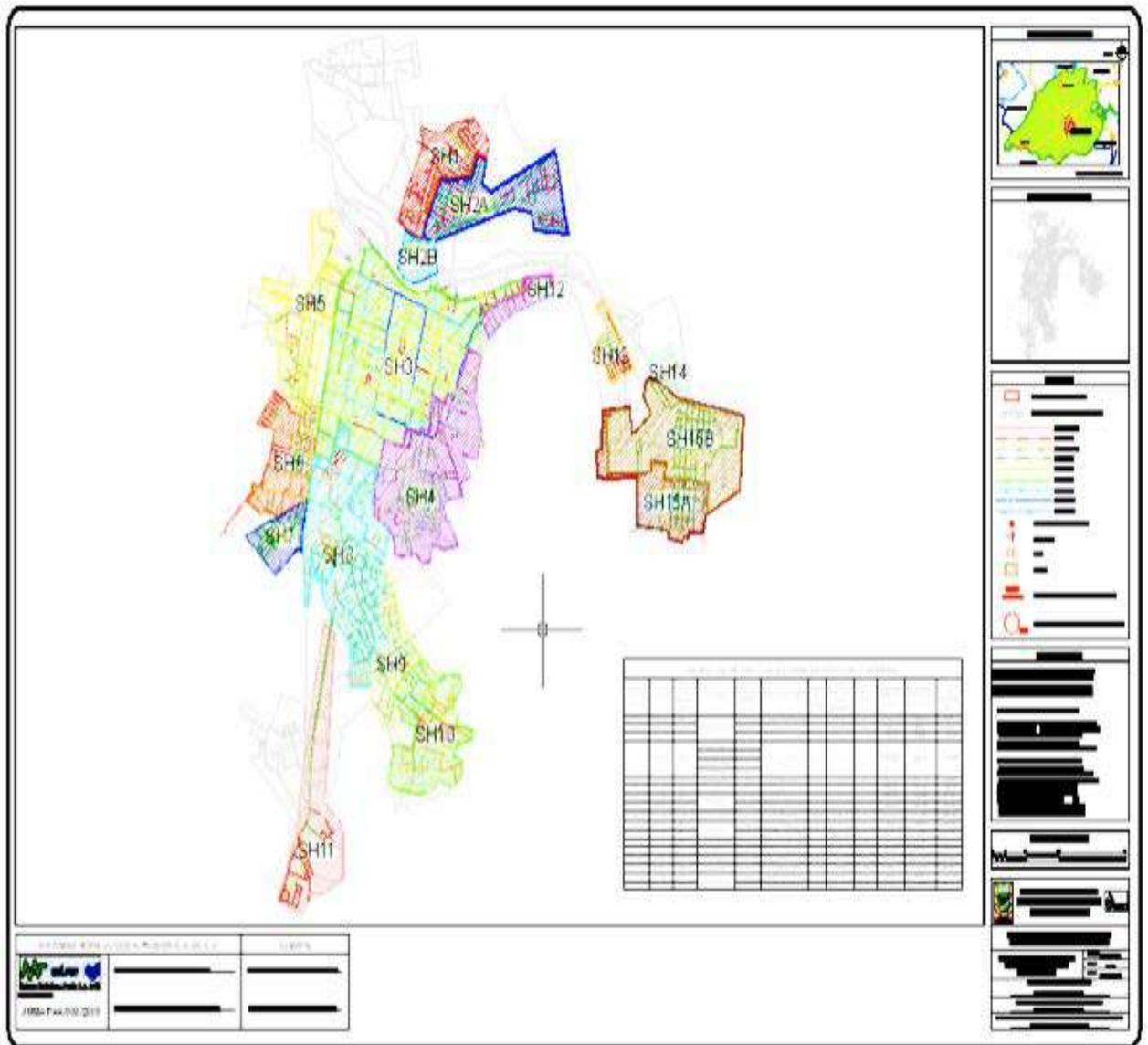


Figura 3.28.a. Vista del plano general.

	JUNTA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO	
	PROYECTO EJECUTIVO DE SECTORIZACIÓN DE REDES	
SECTORIZACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE PLANO GENERAL	ESCALA:	SIN ESCALA
	PLANO:	SP-01
	FECHA:	Julio de 2009
_____ JEFE DEL DEPARTAMENTO DE PROYECTOS Y OBRAS		
_____ JEFE DEL DEPARTAMENTO DE PROYECTOS DE AGUA POTABLE Y CATASTROS		

Figura 3.28.b. Detalle de los datos generales del sistema y del plano.

NOTAS GENERALES	
Datos técnicos del proyecto de sectorización:	
Población al 2019:	57,924 habitantes
Índice de hacinamiento:	4.29 hab/vivienda
Cobertura de agua potable:	98 %
Número de tomas domésticas:	13,232
Población servida:	56,766 habitantes
Porcentaje de macromedición:	100 %
Gasto medio producido:	281.03 L/s
Dotación de proyecto:	235.00 L/hab/día
Tipo de suministro:	Con tanques reguladores
Número de pozos en funcionamiento:	14
Horas de servicio promedio:	24
Número de tanques en funcionamiento:	27
Capacidad de almacenamiento disponible:	5,192 m ³
Capacidad de almacenamiento necesaria:	2,741 m ³

Figura 3.28.c Datos generales del proyecto.



Figura 3.28.d. Detalle de zonas de influencia de sectores e infraestructura de abastecimiento, conducción y regularización principal.

BALANCE VOLUMÉTRICO DE LA SECTORIZACIÓN

Sector hidráulico propuesto	Habitantes	Gasto medio requerido (L/s)	Fuentes	Gasto de producción medido (L/s)	Operación y entrega	Horas de entrega	Gasto requerido para regulación	Diferencia gasto por zona (L/s)	Capacidad del tanque (m3)	Capacidad requerida para regulación (m3)	Diferencia de regulación (m3)
1	1550.00	4.22	Anexo Loma Bonita	6.76	T. Anexo Loma bonita	21.00	6.75	0.01	50.00	43.08	6.92
2A	1762.00	4.79		7.68	T. Loma bonita II	21.00	7.67	0.01	50.00	48.97	1.03
2B	1244.00	3.38		37.06	T. Loma bonita	21.00	5.41	31.65	150.00	34.58	115.42
3	23728.00	64.54	López Rayón	34.3	T. López Rayón	20.00	108.42	17.34	2,000.00	840.18	1,159.82
			Emilio Carranza	18.35							
			Loma Bonita	44.3							
			I. Zaragoza*	28.8							
4	3835.00	10.43	Guanajuatito	26.5	T. La Ascensión	16.00	21.90	4.60	400.00	291.14	108.86
5	2964.00	8.06	Campo Unión	45.2	T. Campo Unión	18.00	15.05	30.15	300.00	156.53	143.47
6	2107.00	5.73	Malayas I	12.05	T. Malayas II	16.00	12.03	0.02	200.00	159.86	40.04
7	1656.00	4.50		29.55	T. Valle de Acámbaro	16.00	9.46	20.09	150.00	125.72	24.28
8	7774.00	21.14	Dr. Jolly	42.8	T. La Soledad	18.00	39.47	3.33	700.00	410.54	289.46
9	2569.00	6.99	San Isidro II	13.53	T. Gardenia	18.00	13.04	0.49	180.00	135.67	44.33
10	1982.00	5.39		10.07	T. San Isidro I	18.00	10.06	0.01	200.00	104.67	95.33
11	2420.00	6.58	Everardo Morales	12.8	T. Everardo Morales	18.00	12.29	0.51	200.00	127.80	72.20
12	1073.00	2.92	Emilio Carranza	4.95	T. Emilio Carranza	20.00	4.90	0.05	150.00	37.99	112.01
13	524.00	1.43	Luis Echeverría	10.3	T. Luis Echeverría 1 y 2	12.00	3.99	6.31	120.00	66.04	53.96
14	107.00	0.29	Camelinas	4.5	T. Camelinas	10.00	0.98	3.52	42.00	16.55	25.45
15A	339.00	0.92	Velasco Ibarra	2.22	T. Velasco Ibarra Arriba	14.00	2.21	0.01	150.00	32.61	117.39
15B	1132.00	3.08		21.08	T. Velasco Ibarra Abajo	14.00	7.39	13.69	150.00	108.89	41.11
SUMAS	56,766	154		413			281.03		5,192.00	2,740.92	2,451.08

Figura 3.28.e. Datos de diseño de cada sector del proyecto.

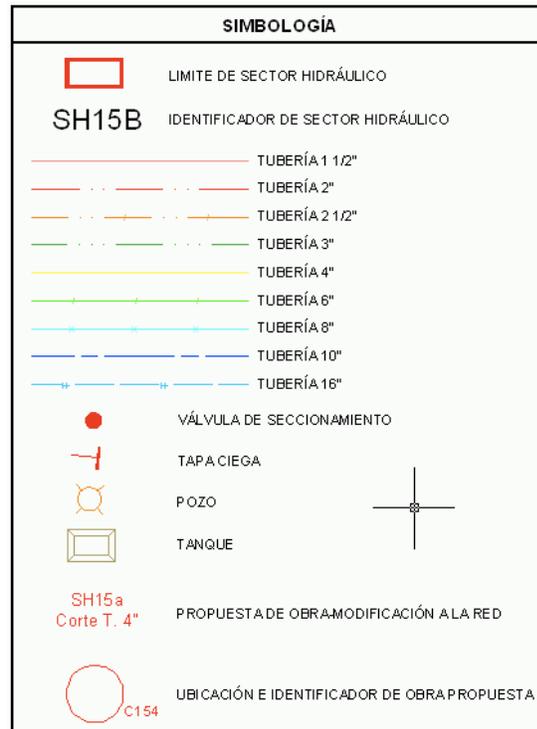


Figura 3.28.f. Simbología.

RESUMEN DE OBRA PRINCIPAL	
Concepto	Cantidad
Instalación de tubería 2"-10"	4436
Corte de tubería 2" -10"	78
Cajas de válvulas	31
Válvulas Reguladoras de presión	25
Válvulas Reguladoras de caudal	11
Válvulas de seccionamiento	8
Equipos de bombeo nuevos	14

Figura 3.28.g. Resumen general de obra y de equipamiento requerido.

Figura 3-28. Ejemplo de un plano general del proyecto de sectorización de red de distribución de agua potable.

b) Planos ejecutivos de sectores de la red de proyecto

Los planos ejecutivos de sectores de la red de proyecto se dibujan para indicar los cambios, adecuaciones y modificaciones que resultaron del diseño y que fueron etiquetados en el modelo de simulación hidráulica. Normalmente, se dibujan a escala 1:20000, por lo que resulta regularmente un plano por cada sector de proyecto.

Además de los datos generales y simbología, en los planos ejecutivos de sectores del proyecto se debe dibujar la siguiente información:

- Croquis de localización e influencia del sector dentro de la red.
- Ubicación y detalle de la infraestructura de almacenamiento, rebombeo y suministro de agua del sector.
- Red primaria del sector y sus modificaciones de diseño.
- Red secundaria de distribución del sector y adecuaciones de diseño.
- Datos de diseño del sector.

En la Figura 3-29 se muestra el ejemplo de un plano ejecutivo con los detalles constructivos de un sector hidrométrico, que forma parte de un proyecto de sectorización de una red de distribución de agua potable.

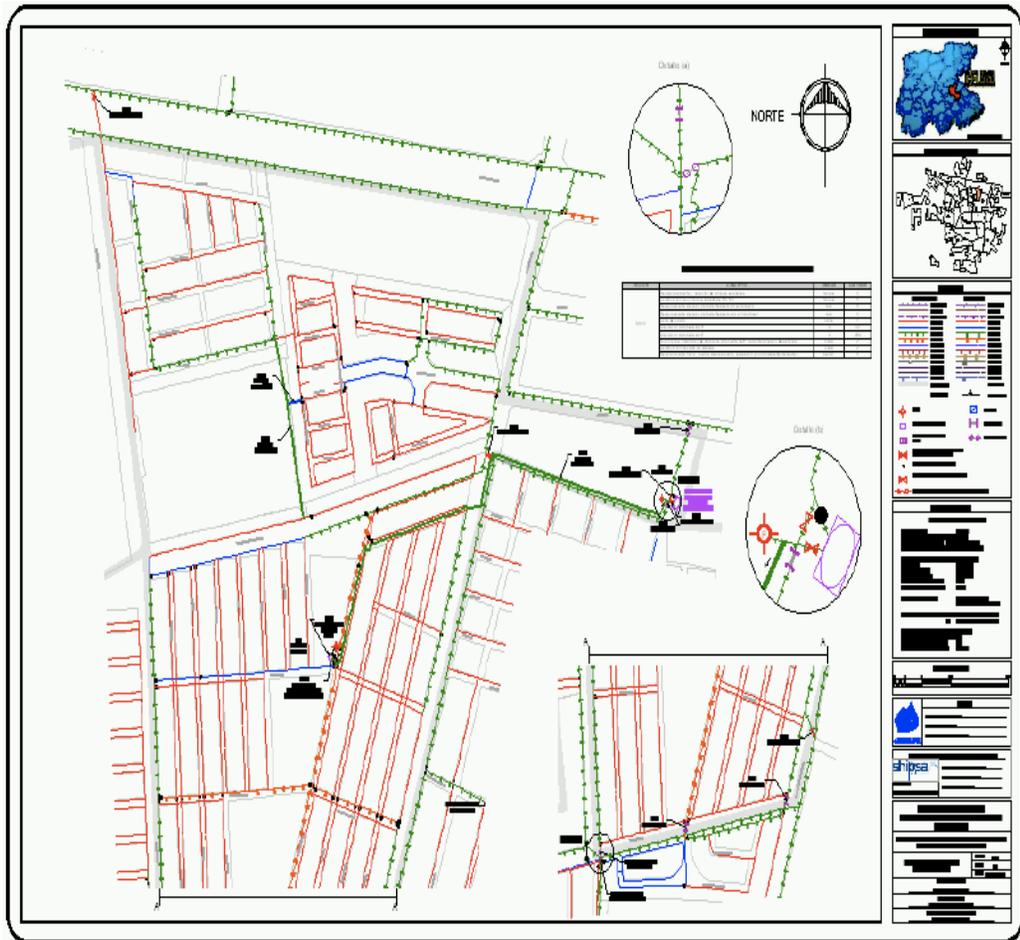


Figura 3.29.a. Plano ejecutivo de diseño de un sector.

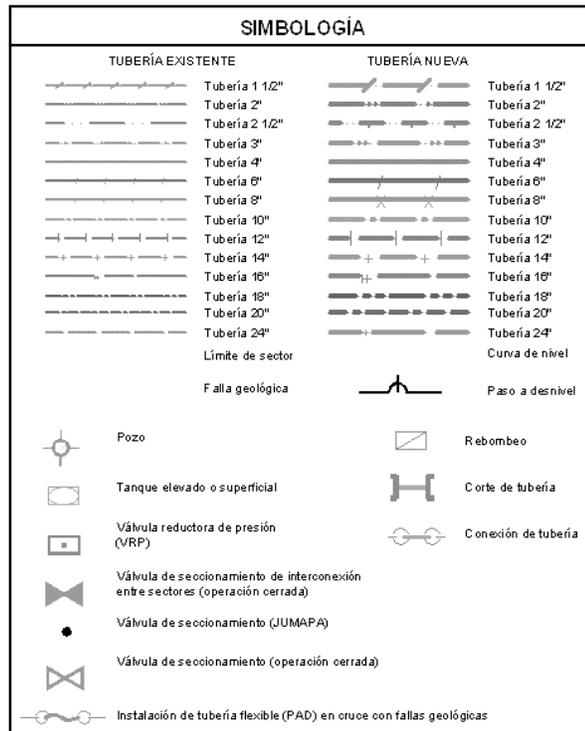


Figura 3.29.b. Simbología (infraestructura existente y de proyecto).

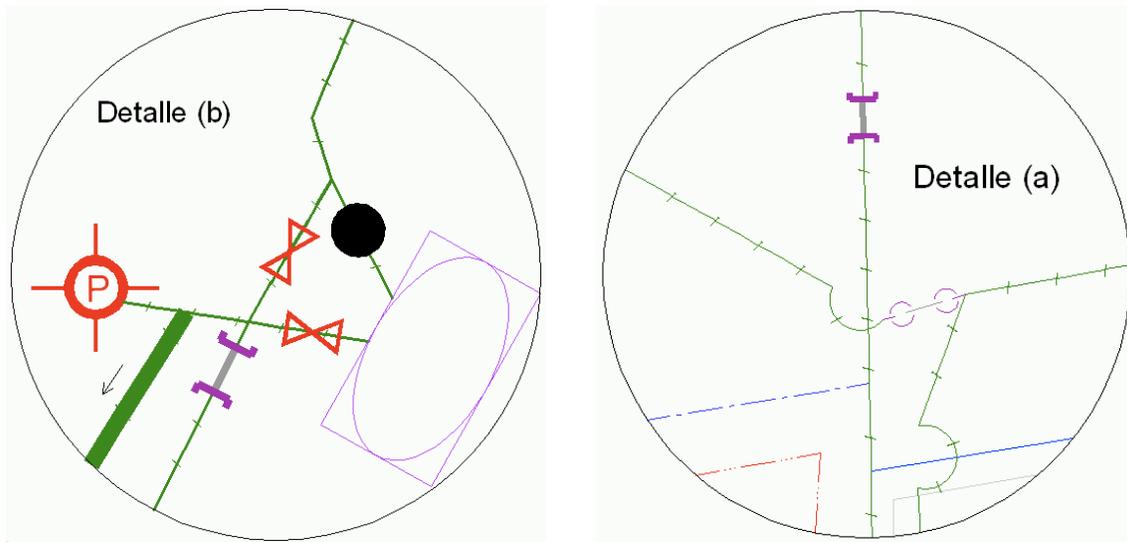


Figura 3.29.c. Detalles de diseño señalados en el plano del sector.

Figura 3-29. Ejemplo de un plano ejecutivo de diseño de un sector de la red de distribución de agua potable.

c) Plano de detalles constructivos del proyecto de sectorización de la red

En el plano de detalles constructivos del proyecto de sectorización de la red se dibujan los cruceros de la red de diseño, las particularidades de obras y equipos, la descripción de las cantidades de obra civil, hidráulica y electromecánica.

En el plano de detalles constructivos se recomienda incluir los dibujos e información siguiente:

- Cuadros de cruceros con despiece de accesorios, válvulas, tubos, reducciones, etc.
- Dimensiones de zanjas para instalación de tuberías.
- Dimensiones de atraques de concreto para piezas especiales.
- Detalles constructivos de cajas de válvulas.
- Detalle de la construcción y montaje de estaciones de medición, trenes para válvulas automáticas, pozos, tanques y rebombeos.
 - Listado de las obras hidráulicas a ejecutar (cortes, conexiones, ampliaciones, cajas de válvulas, estación de macromedición, etc.).

Ejemplo)

En la Figura 3-30 se muestra un ejemplo del plano de detalles constructivos que se derivan del proyecto de sectorización de la red de agua potable.

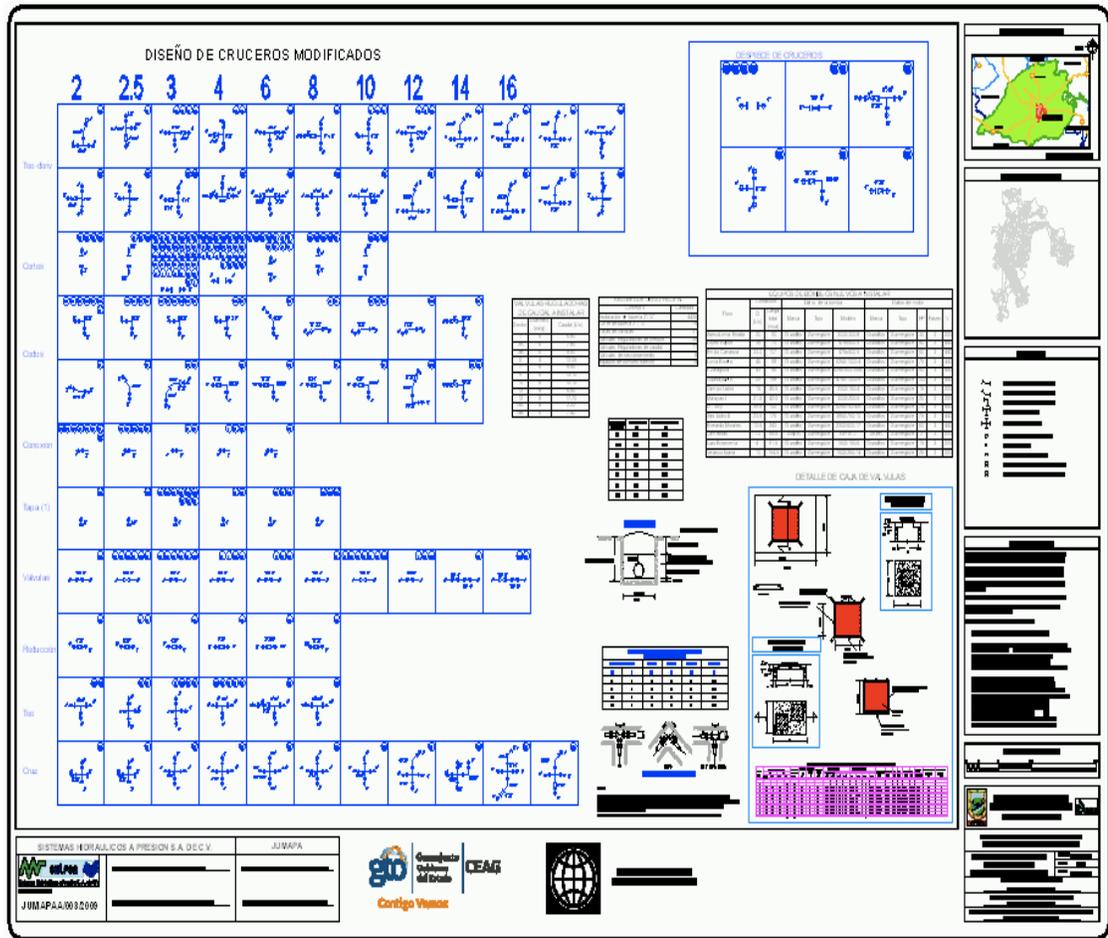


Figura 3.30.a. Vista global del plano de detalles constructivos del proyecto de sectorización de la red.

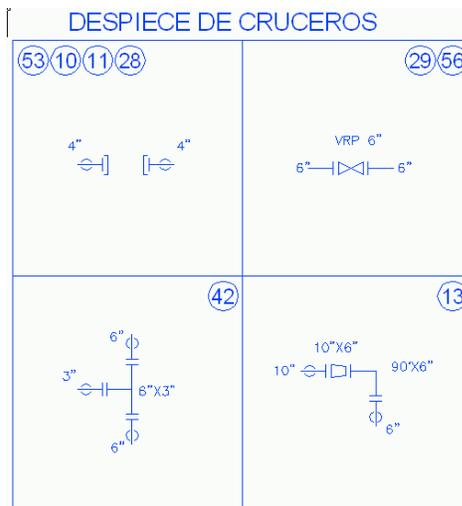


Figura 3.30.b. Despiece de cruceros de proyecto.

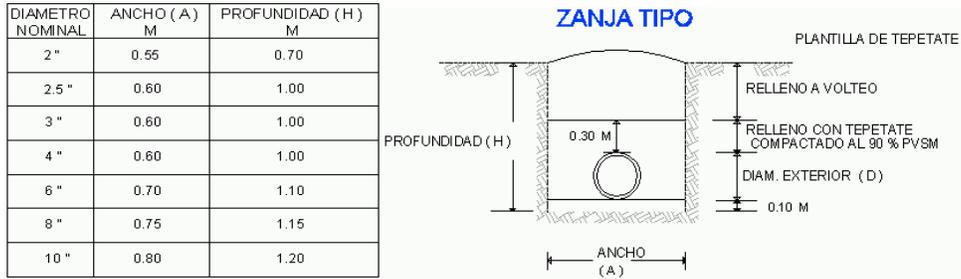


Figura 3.30.c. Dimensiones de las zanjas.

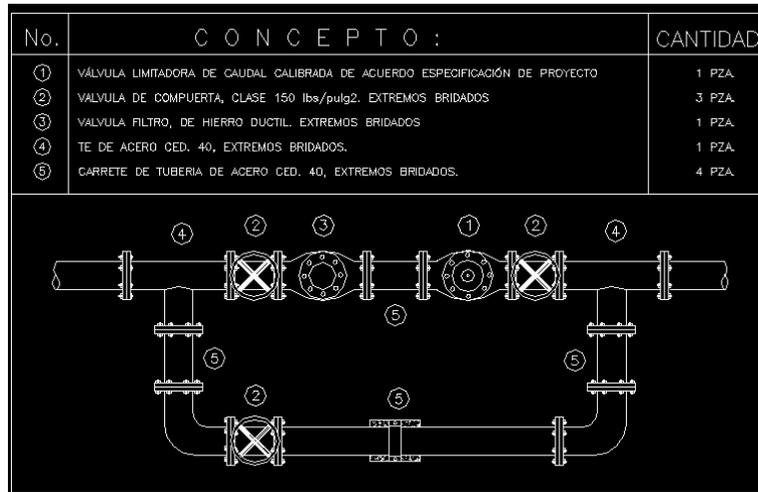


Figura 3.30.d. Despiece de trenes de válvulas limitadoras de caudal.

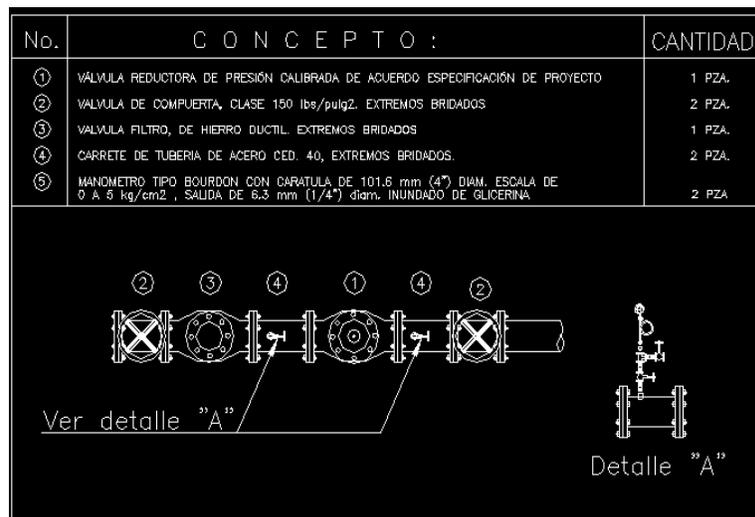


Figura 3.30.e. Despiece de trenes de válvulas reductoras de presión.

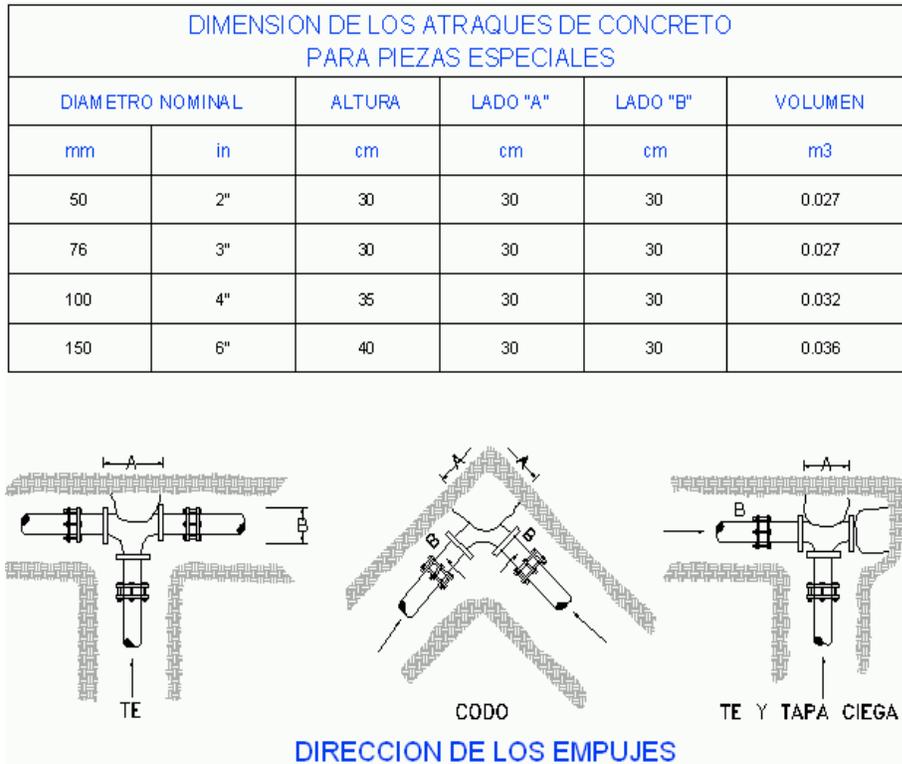
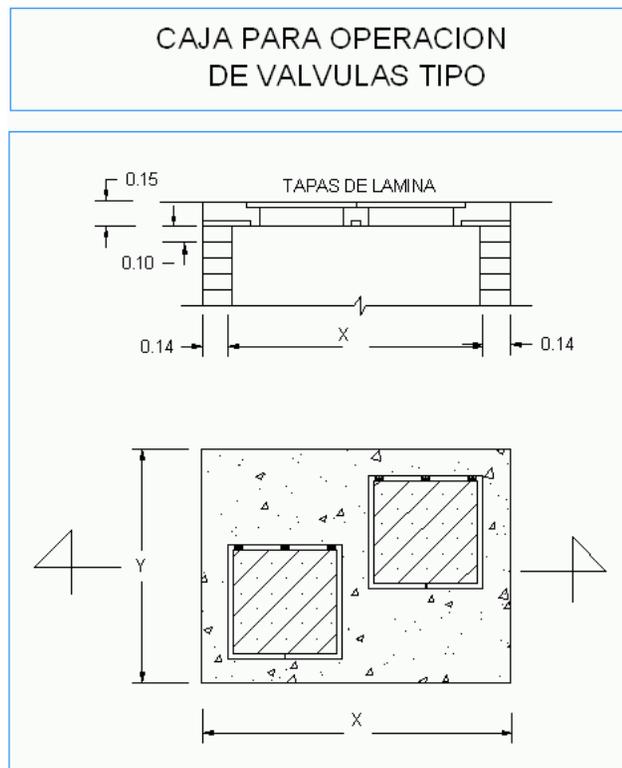


Figura 3.30.f. Dimensiones de atraques.



VOLUMENES DE OBRA EN CAJAS PARA OPERACION DE VALVULAS

CAJA TIPO	DIAM. DE VALVULAS				CANTIDAD VALVULAS (pza.)	ALTURA h (cm.)	ESPESOR LOSA c (cm.)	ESPESOR MURO e (cm.)	DIMENSIONES				CONTRAMARCO				EXCAVACION (m ³)	PLANTILLA (m ²)	PISO (m ³)	MURO (m ²)	APLANADO (m ²)	DALA (m.)	LOSA DE TECHO CONCRETO (cm ³)	ACERO EN PISO Y TECHO (Kg)	PERALTE DE DALA d (cm.)							
	DE		A						INTERIORES		EXTERIORES		SENCILLO (cm.)	DOBLE (cm.)	CANTIDAD (cm.)	PERFIL (cm.)										PISO (m ²)	MURO (m ²)	APLANADO (m ²)	DALA (m.)	LOSA DE TECHO CONCRETO (cm ³)	ACERO EN PISO Y TECHO (Kg)	PERALTE DE DALA d (cm.)
	(mm.)	(plg.)	(mm.)	(plg.)					a (cm.)	b (cm.)	x (cm.)	y (cm.)																				
1	50	2.5	60	2	1	110	15	14	70	70	100	100	90	-	1	102	1.100	1.00	0.10	2.06	2.16	3.44	0.11	12	15							
2	75	6	150	3	1	135	15	14	100	90	130	120	110	-	1	102	2.106	1.56	0.16	3.77	3.88	4.44	0.20	21	15							
3	200	14	350	8	1	200	20	28	140	120	200	180	140	-	1	152	7.200	3.60	0.36	8.42	8.58	6.48	0.67	51	30							
4	400	20	500	16	1	240	20	28	170	160	230	220	180	-	1	152	12.144	5.06	0.51	13.40	13.52	7.88	0.96	73	30							
5	50	4	100	2	2	125	15	14	130	90	160	120	110	-	2	102	2.400	1.92	0.19	3.78	4.03	5.04	0.21	23	15							
6	150	8	200	6	2	160	20	28	140	120	200	180	-	180	1	152	5.760	3.60	0.36	5.83	6.43	6.48	0.62	48	30							
7	250	14	350	10	2	200	20	28	190	160	250	220	180	-	2	152	11.000	5.50	0.55	10.76	11.46	8.28	1.00	77	30							
8	400	18	450	16	2	220	20	28	220	160	280	220	180	-	2	152	13.552	6.16	0.62	13.32	13.97	8.88	1.13	86	30							
9	50	4	100	2	2	125	15	14	120	90	150	120	140	-	2	102	2.250	1.80	0.18	3.63	3.85	4.84	0.20	22	15							
10	150	8	200	6	2	155	15	14	130	120	160	150	140	-	2	102	3.720	2.40	0.24	5.92	6.10	5.64	0.29	30	15							
11	250	14	350	10	2	200	20	28	170	160	230	220	180	-	2	152	10.120	5.06	0.51	10.24	10.82	7.88	0.91	70	30							
12	50	6	150	2	3	140	20	28	140	110	200	170	180	-	2	152	4.760	3.40	0.34	4.40	5.16	6.28	0.53	43	30							
13	200	18	450	8	3	220	20	28	230	160	290	220	180	-	3	152	14.036	6.38	0.64	13.62	14.33	9.08	1.13	87	30							

Figura 3.30.g. Dimensiones y volúmenes de obra de cajas de válvulas.

Figura 3-30. Ejemplo de plano de detalles constructivos en proyecto de sectorización de la red de agua potable.

d) Planos de distritos hidrométricos del proyecto de sectorización de la red

Los planos de los distritos hidrométricos también se dibujan de manera individual para cada distrito. En este plano se incluye el diseño de las estaciones de aforo tipo, indicando su ubicación, detalles constructivos, lista de medidores a instalar, accesorios y las recomendaciones de su operación.

Ejemplo)

En la Figura 3-31 se muestra un ejemplo de un plano ejecutivo típico del diseño de un distrito hidrométrico, correspondiente a un proyecto de sectorización de la red de distribución de agua potable.

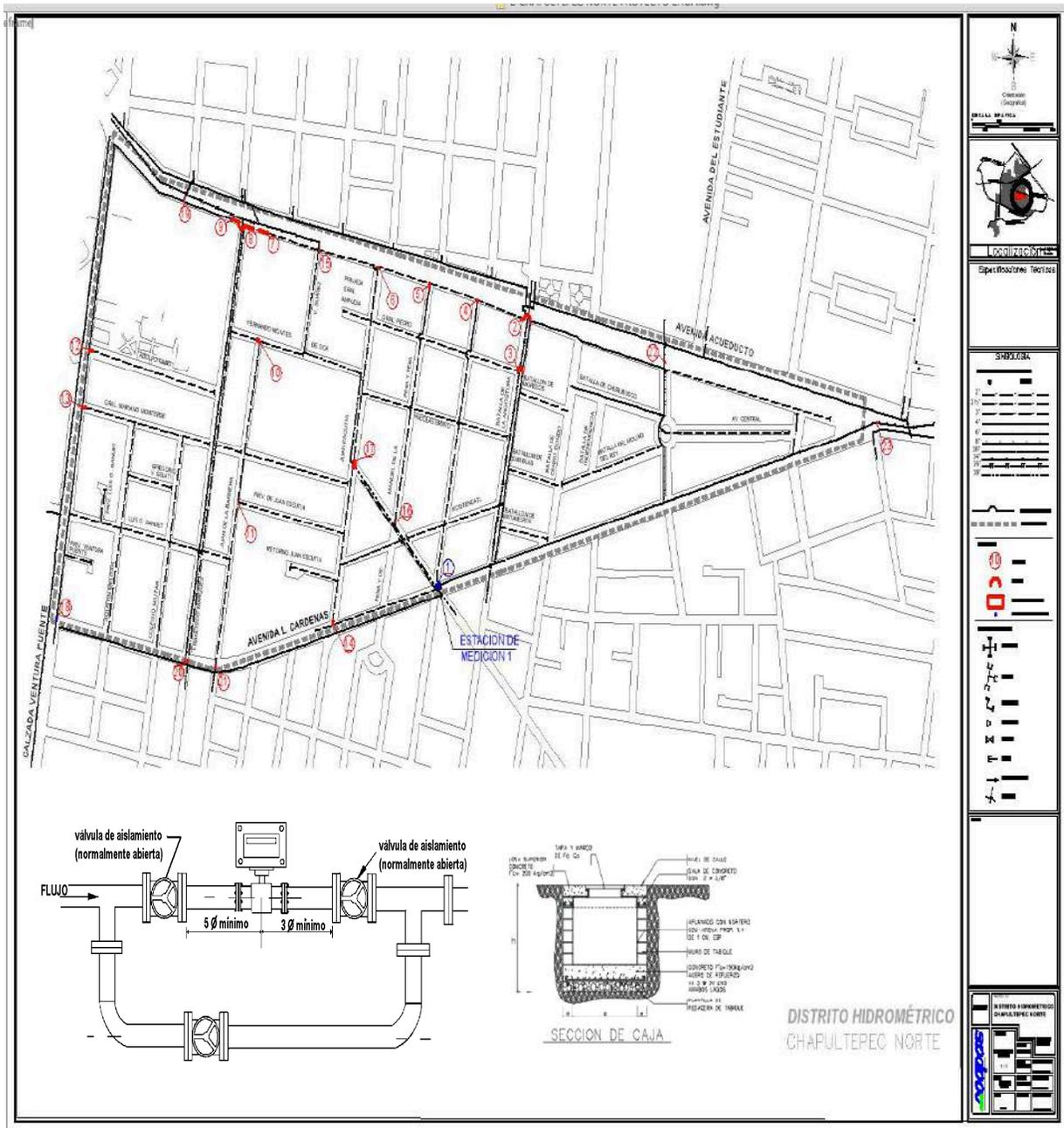


Figura 3-31. Ejemplo de un Plano ejecutivo típico del diseño de un distrito hidrométrico en un proyecto de sectorización de red.

3.4.2 Cuantificación de obras a ejecutar en la sectorización de la red y presupuesto base

La implementación del proyecto de sectores implica construir obras civiles e hidráulicas en la red de distribución. Adicionalmente a la elaboración de los planos, el proyecto ejecutivo de sectorización de la red se complementa con el cálculo de las cantidades de obra requeridas para llevar a cabo el proceso constructivo y de instrumentación de los sectores.

Las principales cantidades de obra que es necesario cuantificar son las siguientes:

- Obra civil e hidráulica. Cortes, conexiones, ampliaciones y sustituciones de tuberías; cajas de válvulas; y atraques.
- Instalación de válvulas. Seccionamiento y de control automático.
- Equipo de medición. Medidores de caudal y presión.
- Equipos de bombeo. Sustitución de bombas y motores.
- Obras complementarias. Rehabilitación de tanques, cárcamos y pozos.

También, es muy importante considerar en las cantidades todas aquellas actividades previas y complementarias a la construcción, que tienen como objetivo poner en operación hidráulica los sectores de la red, tales como los trabajos de reconocimiento de campo, verificación del diseño en sitio, las pruebas de aislamiento de sectores y la calibración de medidores y válvulas de control automático.

Generalmente, la cuantificación de las cantidades de obra se realiza a partir de los planos ejecutivos y los detalles constructivos que han sido definidos en el proyecto de sectorización. Normalmente, se presentan en tablas en un listado donde se indica el tipo de obra y las especificaciones técnicas, respectivas.

Ejemplo)

En el Cuadro 3-4 se muestra un ejemplo del listado de las cantidades de obra que incluye un diseño ejecutivo de sectorización de la red de agua potable.

Cuadro 3-4. Ejemplo del listado de cantidades de obra a ejecutar en un proyecto de sectorización de red.

Concepto	Unidad	Cantidad
1. Revisión de información técnica de sectores, reconocimiento de campo y elaboración de programa de aislamiento y de puesta en marcha de sectores	Sector	12
2. Obras de aislamiento del sector		
2.1. Construcción de cajas de registro para instalación de válvulas de control automático para diámetros de 4 y 3 pulgadas. Incluye material, mano de obra, excavación, demolición y reposición de pavimento, retiro de escombros, equipo y herramienta menor.	Caja	5.00
2.2. Seccionamientos en tuberías de 1", 2.5", 3", 4" y 6" de diámetro, con tapas metálicas en los extremos. Incluye material, mano de obra, excavación, demolición y reposición de pavimento, retiro de escombros, equipo y herramienta menor.	Corte	18.00
2.3. Conexiones de tuberías de igual diámetro de PVC, con valores de 3" y 4", con extremidades de acuerdo al material de la tubería en cuestión. Incluye material, mano de obra, excavación, demolición y reposición de pavimento, retiro de escombros, equipo y herramienta menor.	Conexión	3.00
2.4. Instalación de tubería de 3" de diámetro de PVC. Incluye material, mano de obra, excavación, demolición y reposición de pavimento, retiro de escombros, equipo y herramienta menor.	Metro	10.00
2.5. Instalación de tubería de 4" de diámetro de PVC. Incluye material, mano de obra, excavación, demolición y reposición de pavimento, retiro de escombros, equipo y herramienta menor.	Metro	15.00
3. Suministro e instalación de equipos de control en el sector		

Concepto	Unidad	Cantidad
<i>3.1. Suministro e instalación de válvulas de control automático de 4" de diámetro, reductora de presión. Incluye mano de obra, materiales y herramientas.</i>	<i>Válvula</i>	<i>2.00</i>
<i>3.2. Suministro e instalación de válvulas de control automático de 3" de diámetro, reductora de presión. Incluye mano de obra, materiales y herramientas.</i>	<i>Válvula</i>	<i>3.00</i>
<i>3.3. Suministro e instalación de válvulas de control tipo compuerta de 4" de diámetro. Incluye mano de obra, materiales y herramientas.</i>	<i>Válvula</i>	<i>1.00</i>
<i>3.4. Suministro e instalación de válvulas de control tipo compuerta de 6" de diámetro. Incluye mano de obra, materiales y herramientas.</i>	<i>Válvula</i>	<i>3.00</i>
<i>3.5. Suministro e instalación de macromedidor, tipo electromagnético de 4" de diámetro en el pozo 7. Incluye mano de obra, materiales y herramientas</i>	<i>Medidor</i>	<i>8.00</i>
<i>3.6. Suministro e instalación de macromedidor, tipo electromagnético de 6" de diámetro en el pozo 3. Incluye mano de obra, materiales y herramientas</i>	<i>Medidor</i>	<i>4.00</i>
4. Aislamiento de sector	<i>Sector</i>	<i>12.00</i>
5. Evaluación de la eficiencia del sector		
<i>5.1. Evaluación de la eficiencia hidráulica</i>	<i>Sector</i>	<i>12.00</i>
<i>5.2. Evaluación de la eficiencia volumétrica (fugas de agua)</i>	<i>Sector</i>	<i>12.00</i>
6. Transferencia de la operación del sector al organismo operador	<i>Sector</i>	<i>12.00</i>
7. Integración de informe con planos finales	<i>Informe</i>	<i>1.00</i>

Finalmente, el diseño ejecutivo de sectorización de la red incluye, por un lado, una memoria de cálculo, para la revisión posterior del desarrollo del diseño; y, por otro, un desglose del presupuesto base que servirá para la asignación de recursos y como punto de referencia durante el proceso de licitación y asignación de las obras a los constructores.

La memoria de cálculo se realiza en formato electrónico y se elabora dividiéndola por cada concepto del diseño, de tal manera que resulte fácil su revisión. En la memoria se describen los procedimientos, criterios, ecuaciones, gráficas, coeficientes, cálculos, etc., que respaldan el diseño de la sectorización de la red. Cuando se utiliza software para el análisis, se explica la forma en que se aplicó, el procedimiento de captura de datos, entre otros.

Por su parte, el presupuesto base se elabora con el listado de cantidades de obra, anotando en una columna adicional el precio unitario de cada concepto y, en otra columna, el monto respectivo, que resulta de multiplicar dicho precio unitario por la cantidad. En los proyectos de sectorización de red de abastecimiento de agua potable se recomienda realizar el presupuesto base, separado para cada uno de los sectores que resultaron en el diseño, ya que será más fácil tomar decisiones si se programa construirlo en varias etapas.

Ejemplo)

En el Cuadro 3-5 se presenta un ejemplo clásico del presupuesto base de un proyecto de sectorización, el cuál puede ser utilizado como una guía para cualquier proyecto, ajustando las cantidades y precios unitarios de cada caso particular.

Cuadro 3-5. Ejemplo clásico de un presupuesto base de un proyecto de sectorización.

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$/unidad)	Monto (\$)
1. Revisión de información técnica de sectores, reconocimiento de campo y elaboración de programa de aislamiento y de puesta en marcha de sectores	Sector	12	12,500.00	150,000.00
2. Obras de aislamiento del sector				
2.1. Construcción de cajas de registro para instalación de válvulas de control automático para diámetros de 4 y 3 pulgadas. Incluye material, mano de obra, excavación, demolición y reposición de pavimento, retiro de escombros, equipo y herramienta menor.	Caja	5.00	9,200.00	46,000.00
2.2. Seccionamientos en tuberías de 1", 2.5", 3", 4" y 6" de diámetro, con tapas metálicas en los extremos. Incluye material, mano de obra, excavación, demolición y reposición de pavimento, retiro de escombros, equipo y herramienta menor.	Corte	18.00	4,760.00	85,680.00
2.3. Conexiones de tuberías de igual diámetro de PVC, con valores de 3" y 4", con extremidades de acuerdo al material de la tubería en cuestión. Incluye material, mano de obra, excavación, demolición y reposición de pavimento, retiro de escombros, equipo y herramienta menor.	Conexión	3.00	8,520.00	25,560.00
2.4. Instalación de tubería de 3" de diámetro de PVC. Incluye material, mano de obra, excavación, demolición y reposición de pavimento, retiro de escombros, equipo y herramienta menor.	Metro	10.00	1,390.00	13,900.00
2.5. Instalación de tubería de 4" de diámetro de PVC. Incluye material, mano de obra, excavación, demolición y reposición de pavimento, retiro de escombros, equipo y herramienta menor.	Metro	15.00	1,600.00	24,000.00
3. Suministro e instalación de equipos de control en el sector				
3.1. Suministro e instalación de válvulas de control automático de 4" de diámetro, reductora de presión. Incluye mano de obra, materiales y herramientas.	Válvula	2.00	19,050.00	38,100.00
3.2. Suministro e instalación de válvulas de control automático de 3" de diámetro, reductora de presión. Incluye mano de obra, materiales y herramientas.	Válvula	3.00	15,081.25	45,243.75
3.3. Suministro e instalación de válvulas de control tipo compuerta de 4" de diámetro. Incluye mano de obra, materiales y herramientas.	Válvula	1.00	11,500.00	11,500.00
3.4. Suministro e instalación de válvulas de control tipo compuerta de 6" de diámetro. Incluye mano de obra, materiales y herramientas.	Válvula	3.00	19,550.00	58,650.00
3.5. Suministro e instalación de macromedidor, tipo electromagnético de 4" de diámetro en el pozo 7. Incluye mano de obra, materiales y herramientas.	Medidor	8.00	46,000.00	368,000.00

<i>Concepto</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio Unitario (\$/unidad)</i>	<i>Monto (\$)</i>
3.6. Suministro e instalación de macromedidor, tipo electromagnético de 6 " de diámetro en el pozo 3. Incluye mano de obra, materiales y herramientas	<i>Medidor</i>	<i>4.00</i>	<i>73,600.00</i>	<i>294,400.00</i>
4. Aislamiento de sector	<i>Sector</i>	<i>12.00</i>	<i>18,900.00</i>	<i>226,800.00</i>
5. Evaluación de la eficiencia del sector				
5.1. Evaluación de la eficiencia hidráulica	<i>Sector</i>	<i>12.00</i>	<i>13,150.00</i>	<i>157,800.00</i>
5.2. Evaluación de la eficiencia volumétrica (fugas de agua)	<i>Sector</i>	<i>12.00</i>	<i>14,600.00</i>	<i>175,200.00</i>
6. Transferencia de la operación del sector al organismo operador	<i>Sector</i>	<i>12.00</i>	<i>6,000.00</i>	<i>72,000.00</i>
7. Integración de informe con planos finales	<i>Informe</i>	<i>1.00</i>	<i>49,100.00</i>	<i>49,100.00</i>
			SUBTOTAL	1,841,933.75
			IVA 16%	294,709.40
			COSTO TOTAL	2,136,643.15

NOTA: Los precios unitarios, costos y cantidades solo son indicativos para el ejemplo.

Es muy importante anotar que en todas las fases de desarrollo del diseño ejecutivo de sectorización de la red de distribución de agua potable se deberá cumplir con la normatividad, especificaciones y procesos constructivos vigentes del organismo operador del sistema de abastecimiento y/o de aquellas entidades donde se gestionarán los recursos necesarios para su construcción y puesta en operación.

También, es recomendable que durante el cálculo de costos participe el personal de costos y presupuestos del organismo operador, ya que su experiencia ahorrará tiempo, esfuerzo y se tendrán resultados que tomen en cuenta las variables económicas propias del lugar.

3.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO DE SECTORIZACIÓN

3.5.1 Conceptos de la evaluación económica de la sectorización de redes de agua potable

La evaluación económica del proyecto de una obra de ingeniería consiste en determinar los costos de las inversiones y compararlos con los beneficios que se espera obtener al implementarlo; el resultado permite conocer la viabilidad económica de la obra.

En el caso de los proyectos de sectorización de redes de agua potable, los costos corresponden con los montos invertidos para realizar los cambios físicos de la infraestructura y de equipos de bombeo, instrumentar, cambiar la operación e incrementar la eficiencia en la red; como se muestra en la *Figura 3-32*.

Por lo que respecta a los beneficios, básicamente se tienen que asociar con las facilidades que otorga la distribución de agua en sectores en: a) Ahorro de energía eléctrica en los equipos de bombeo al modificar su diseño, b) Ahorro de agua por la redistribución de caudales y, c) Ahorro de agua por la reducción de fugas en la red de abastecimiento; como se muestra en la *Figura 3-33*.



Figura 3-32. Costos de la sectorización de redes de agua potable.



Figura 3-33. Beneficios de la sectorización de redes de agua potable.

Los beneficios económicos de la sectorización de la red de agua potable son inversamente proporcionales a las deficiencias actuales del sistema de distribución. La magnitud de estos beneficios dependerá mucho de la posibilidad para aprovechar al máximo la infraestructura existente y las facilidades que se tengan con la operación del sistema para llevar a cabo el incremento de la eficiencia. Esto repercutirá directamente en las necesidades de inversión en infraestructura nueva y el tiempo de ejecución.

El tiempo es un factor determinante en la evaluación económica del proyecto de sectorización, puesto que los períodos del ejercicio de inversiones (costos) y de la obtención de los beneficios están, por lo general, desfasados dentro del período de diseño elegido, como se muestra en la *Figura 3-34*.

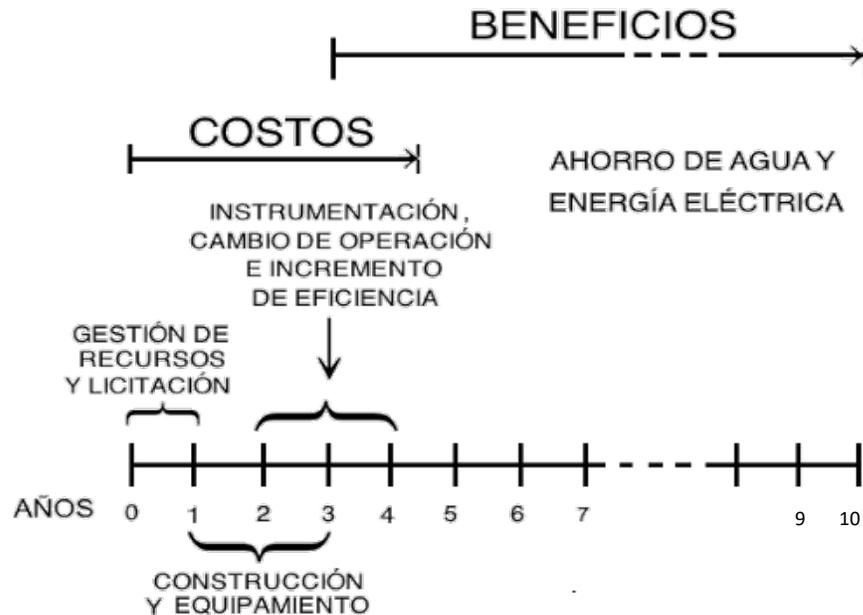


Figura 3-34. Conceptualización esquemática del desfase en el tiempo de los costos con los beneficios de la sectorización de redes de agua potable.

Entonces es necesario calcular todo el flujo de efectivo de los conceptos a su valor presente, abarcando todo el período de diseño, para hacer una evaluación económica equivalente y evitar sesgos por el efecto del tiempo en el valor del dinero.

La experiencia mexicana indica que la estrategia más rentable consiste en programar la sectorización por zonas de la red, dividiendo la ciudad en grandes macrosectores y priorizando las acciones en función de su factibilidad técnica y económica. Con esto, se reducen significativamente los períodos que existen entre la inversión y los beneficios y se fortalece la capacidad financiera del organismo operador para continuar con el programa de sectorización de la red; es decir, el ahorro obtenido en gastos de producción de agua y consumo de energía eléctrica en los sectores construidos y eficientados primeramente, puede ser utilizado para la reinversión en el resto de los sectores de la red.

Existen otros beneficios que monetariamente son difíciles de cuantificar, como la protección al medio ambiente y de los recursos de agua natural, el desfase de construcción de nueva infraestructura, la prolongación de la vida útil de la infraestructura, el aumento en la continuidad del servicio de agua a los usuarios, por mencionar algunos, que no se contemplan aquí para la evaluación económica, pero que es importante considerarlos cualitativamente para la toma de decisiones sobre la factibilidad de la obra. Si el análisis y evaluación de las inversiones se combinan con estos beneficios técnicos y sociales, el resultado de la evaluación puede conducir finalmente a conclusiones positivas sobre el desarrollo de la obra de sectorización.

3.5.2 Cálculo de los costos de la sectorización de la red

Los costos de la sectorización se ejercen particularmente en cada sector, para construir su obra civil, equipar sus bombeos, instrumentarlo, poner en marcha su operación, evaluar eficiencias, regular caudales y reducir las fugas en su red.

La obra civil de la sectorización implica costos para efectuar trabajos de cortes y conexiones de tuberías, construcción de cajas de válvulas, instalación de válvulas, ampliación y sustitución de tramos de tubería, ejecución de cajas para estaciones de medición y rehabilitación de tanques reguladores o cárcamos de bombeo.

El equipamiento del bombeo se realiza por los posibles cambios en las condiciones de su operación, que obligan a hacer un reemplazo con nueva carga-caudal y rehabilitar su sistema electromotriz.

La instrumentación de los sectores se refiere principalmente a la instalación de medidores de caudal en los puntos de suministro de agua, medidores de presión en varios puntos de la red de tuberías y válvulas de control, manuales y automáticas.

Las actividades de verificación del aislamiento físico del sector del resto de la red y su puesta en operación, que repercuten en el incremento de la eficiencia hidráulica de la red, implican también costos que se deben considerar en la evaluación económica del proyecto de sectorización de la red.

Como se describe en el capítulo anterior, para calcular estos costos se utilizan las cantidades de obra y precios unitarios, por pieza en el caso de cajas, cortes, válvulas, conexiones, tanques, cárcamos, bombeos, y por metro lineal en ampliación y sustitución de tuberías. La cantidad de obra depende del número de sectores a construir y los precios varían según el tamaño, diámetro y material de los elementos.

En el caso de equipos de bombeo no hay un procedimiento único para calcular el costo de cada trabajo que se desea ejecutar para optimizar el sistema electromotriz. Normalmente, se evalúa mediante cotizaciones con proveedores de equipos y accesorios y sumando los montos por mano de obra de instalación, gastos administrativos, indirectos, impuestos, etcétera.

Ejemplo)

Por ejemplo, para el cálculo del costo de sustitución del conjunto motor-bomba de un pozo, es necesario primero determinar la carga y caudal de operación, después seleccionar el modelo y marca de equipo en los catálogos de los fabricantes, luego solicitar el costo del equipo a un proveedor y finalmente sumar el costo de la instalación, puesta en operación e indirectos, como se muestra en el Cuadro 3-6.

Cuadro 3-6. Ejemplo del costo de un equipo de bombeo para un pozo de suministro de agua potable.

<i>COSTO DE SUSTITUCIÓN DE EQUIPO DE BOMBEO EN UN POZO</i>	
<i>Carga (m)</i>	<i>117.68</i>
<i>Caudal (L/s)</i>	<i>11.23</i>

<i>COSTO DE SUSTITUCIÓN DE EQUIPO DE BOMBEO EN UN POZO</i>	
<i>Equipo elegido</i>	<i>Bomba sumergible Mca. AS Modelo 6ASL/10 Con válvula check de 4" Para instalarse en el primer tramo de la columna de bomba. Motor de 40 HP Mca. SAER 3F 460V 6" EFICIENCIA 0.79</i>
<i>Cotización proveedor (\$)</i>	<i>40,073.00</i>
<i>Accesorios (\$)</i>	<i>12,780.00</i>
<i>Instalación y operación (\$)</i>	<i>24,700.00</i>
<i>Indirectos (\$)</i>	<i>7,500.00</i>
<i>Subtotal</i>	<i>85,053.00</i>
<i>IVA</i>	<i>13,608.48</i>
<i>MONTO TOTAL CON IVA</i>	<i>98,661.48</i>

Quando se concluye el diseño ejecutivo, entonces se conocen a detalle las cantidades de obra y equipos que implicará la sectorización de la red de distribución, Por esa razón, el cálculo del costo de construcción y equipamiento se estima con base en el catálogo de conceptos y presupuesto base.

Una vez estimados los costos de la implementación del proyecto de sectorización a precio actual, se debe determinar el efecto del tiempo y calcular su valor equivalente, sabiendo que la construcción y puesta en operación regularmente se lleva a cabo durante un período de dos o tres años consecutivos, por lo menos un año después de gestionar los recursos y efectuar la licitación. El cálculo del costo de la construcción, equipamiento, instrumentación, puesta en operación y evaluación de eficiencias, transformados a valor presente se realiza aplicando la *ecuación 3.6*.

$$C_{IS} = f_{F/P,i,N} [C_{oc} + C_b + C_I + C_{po} + C_e] \quad (3.6)$$

Donde:

C_{IS} = Costo de implementación del proyecto de sectorización, a valor presente, en \$.

C_{oc} = Costo de construcción de obra civil, en \$.

C_b = Costo de equipos de bombeo y sistema electromotriz, en \$.

C_I = Costo de instrumentación, en \$.

C_{po} = Costo de puesta en operación, en \$.

C_e = Costo de pruebas y evaluación de eficiencias, en \$.

$f_{F/P,i,N}$ = Factor de pago único - cantidad compuesta, utilizado para obtener un monto capitalizado a una fecha futura especificada durante un cierto período de N años, a una tasa de interés i ; se calcula con la *ecuación 3.7*:

$$f_{F/P,i,N} = (1+i)^N \quad (3.7)$$

Ejemplo)

Un organismo operador invertirá al final de dos años un monto de \$23'750,000 pesos (calculado con precios actuales), para realizar la implementación del proyecto de la sectorización de su red de

agua potable. En el primer año se erogarán 12'000,000 de pesos y el resto en el siguiente año. Determinar el costo a valor presente que se pagará con una tasa de interés anual del 8%.

Solución)

En este caso la inversión calculada con precios actuales de 23'750,000 pesos se realizará al final de cada año en dos pagos, lo cual se visualiza en la Figura 3-35.

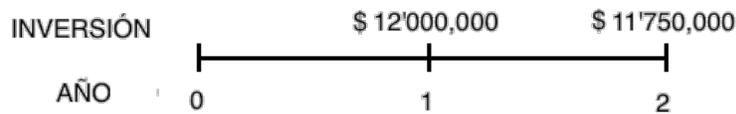


Figura 3-35. Escala de tiempo de inversiones de la implementación del proyecto de la sectorización de la red del ejemplo.

Por ende el costo a valor presente por la construcción e instrumentación de los sectores se obtiene al sustituir valores en la ecuación 3.6 y 3.7, como sigue:

$$C_{IS} = f_{F/P,0.08,1}[12'000,000] + f_{F/P,0.08,2}[11'750,000]$$

$$f_{F/P,i,N} = (1 + 0.08)^1 = 1.08$$

$$f_{F/P,0.08,2} = (1 + 0.08)^2 = 1.1664$$

Por lo tanto, el costo de la implementación de la sectorización de la red, en pesos a valor presente de las inversiones, resulta igual a:

$$C_{IS} = 1.08[12'000,000] + 1.1664[11'750,000] = 26'665,200 \text{ pesos}$$

Los costos de las acciones para la reducción de fugas en los sectores de la red pueden incluir varios conceptos, tales como la reducción de las presiones hidráulicas, rehabilitación de tuberías, control activo de fugas y mejor calidad y rapidez de las reparaciones. Por lo tanto, durante la evaluación económica es conveniente que se establezca cuál será la, o las estrategias que se implementarán para reducir las fugas.

Es complicado definir a priori las estrategias de reducción de fugas, ya que depende en buena medida de los resultados de la evaluación técnica de la eficiencia volumétrica que se realiza con las pruebas en campo una vez que ha sido puesta la operación de cada sector. Por lo tanto, para efectos de la evaluación económica del proyecto de sectorización de la red en esta etapa de diseño, es suficiente que se estime solamente el costo de la estrategia del control activo de fugas, considerando la localización y reparación de fallas y agregando el costo de las actividades permanentes de la gestión del control de fugas.

Una forma de estimar el costo de la localización y reparación de fugas potenciales en los sectores de la red es como sigue (Ref. 3.10):

- Se selecciona un cierto período de análisis t_f , por ejemplo un día, una semana, un mes o un año.
- Se estima el volumen de fugas potenciales, V_{PRP} (m^3/t_f), utilizando los procedimientos descritos en el inciso 2.5.4 de este libro.
- Se calcula el volumen total de fugas $V_{FR20\%}$ (m^3/t_f), que se pretende reducir con la reparación de fugas, con el fin de alcanzar el nivel de pérdidas reales del 20%.

$$V_{FR20\%} = V_{PRP} - 0.2 (V_{suministro}) \quad (3.8)$$

La variable $V_{suministro}$ es igual al volumen anual de agua suministrada a cada sector, en m^3/t_f .

- Se multiplica el volumen total de fugas por reducir $V_{FR20\%}$ por cada porcentaje de ocurrencia de fugas en la red (%tomas domiciliarias, %tuberías, %cajas de válvulas), para obtener el volumen de fugas por reducir en tomas domiciliarias V_{FT} , tuberías V_{Ftubos} y cajas de válvulas V_{FV} .
- Se divide el volumen de fugas por reducir de cada elemento de la red (V_{FT} , V_{Ftubos} , V_{FV}) entre el volumen unitario promedio de fuga en toma domiciliaria V_{FTu} ($m^3/toma/t_f$), tuberías ($m^3/fuga-tubo/t_f$), válvula ($m^3/válvula/t_f$), para obtener un número esperado de tomas domiciliarias con fuga potencial N_{FT} , de tuberías N_{Ftubos} y de cajas de válvulas N_{FV} .
- El costo de localización y reparación de las fugas potenciales por reducir C_F , se calcula multiplicando el número de fugas de cada rubro, por su costo unitario respectivo (\$/fuga localizada y reparada).

Adicional al costo de la reducción de fugas, se deberá considerar un costo anual continuo, para mantener el control de fugas de forma permanente en los sectores de la red de distribución de agua potable, C_{CFP} .

Ejemplo)

Un sistema de agua potable ha puesto en operación un sector de la red con 940 tomas domiciliarias. Las mediciones de campo indican que se está suministrando un volumen de agua semanal de 10,890 metros cúbicos. Se ha estimado que en el mismo período los usuarios consumen solamente un volumen de 6,750 metros cúbicos. Las estadísticas y datos relacionados se muestran en el Cuadro 3-7. Calcular el costo esperado de la reparación de las fugas potenciales en el sector, considerando que el control de fugas permanente tiene un costo de 265.00 \$/toma/año.

Cuadro 3-7. Datos estadísticos del ejemplo de costo de fugas.

<i>Elemento</i>	<i>Ocurrencia de fugas (%)</i>	<i>Caudal unitario de fuga (mililitros/segundo)</i>	<i>Costo unitario de reparación (\$/fuga)</i>
<i>Toma domiciliaria</i>	<i>73.0</i>	<i>23.0</i>	<i>1,915.0</i>
<i>Tubería</i>	<i>16.0</i>	<i>105.0</i>	<i>3,934.0</i>
<i>Caja de válvula</i>	<i>11.0</i>	<i>82.0</i>	<i>2,386.0</i>

Solución)

Primero se calcula el volumen de fugas potenciales, restando el volumen suministrado del consumido en la semana, es decir:

$$V_{PRP} = V_{\text{Suministro}} - V_{\text{consumo}} = 10,890 - 6,750 = 4,140 \text{ m}^3 / \text{semana}$$

Que representan en 38.02% del volumen suministrado.

El volumen de fugas a reducir para alcanzar el 20% del volumen suministrado se determina con la ecuación 3.8, entonces:

$$V_{FR20\%} = V_{PRP} - 0.2(V_{\text{suministro}}) = 4,140 - 0.2(10,890) = 1,962 \text{ m}^3 / \text{semana}$$

Ahora se obtienen los volúmenes de fugas para cada tipo de elemento de la red de la forma siguiente:

$$V_{FT} = 1,962 \times 0.73 = 1,432.3 \text{ m}^3 / \text{semana}$$

$$V_{\text{Tubos}} = 1,962 \times 0.16 = 313.9 \text{ m}^3 / \text{semana}$$

$$V_{FV} = 1,962 \times 0.11 = 215.8 \text{ m}^3 / \text{semana}$$

Al dividir estos valores entre el volumen unitario de fugas se obtiene el número de fugas esperado en el sector de cada elemento:

$$N_{FT} = \frac{1,432.3 \text{ m}^3 / \text{semana}}{\frac{23 \text{ ml} / \text{s}}{1'000,000 \text{ ml} / \text{m}^3} \cdot 86,400 \text{ s} / \text{día} \times 7 \text{ días} / \text{semana}} \approx 103 \text{ fugas - toma - domiciliaria}$$

$$N_{FT} = \frac{313.9 \text{ m}^3 / \text{semana}}{\frac{105 \text{ ml} / \text{s}}{1'000,000 \text{ ml} / \text{m}^3} \cdot 86,400 \text{ s} / \text{día} \times 7 \text{ días} / \text{semana}} \approx 5 \text{ fugas - tubería}$$

$$N_{FT} = \frac{215.8 \text{ m}^3 / \text{semana}}{\frac{82 \text{ ml} / \text{s}}{1'000,000 \text{ ml} / \text{m}^3} \cdot 86,400 \text{ s} / \text{día} \times 7 \text{ días} / \text{semana}} \approx 4 \text{ fugas - caja - válvula}$$

Así, el costo total esperado de la reparación de fugas potenciales se muestra en el Cuadro 3-8.

Cuadro 3-8. Resultados del costo de reparación de fugas del ejemplo.

Elemento	Número de fugas potenciales (%)	Costo unitario de reparación (\$/fuga)	Costo reparación, C_F (\$)
Toma domiciliaria	103.0	1,915.0	197,245.0
Tubería	5.0	3,934.0	19,670.0
Caja de válvula	4.0	2,386.0	9,544.0

<i>SUMA</i>	226,459.00
-------------	------------

El costo adicional por el trabajo de control de fugas permanente anual es igual a:

$$C_{CFP} = 265.00 \text{ \$/ toma / año} \times 940 \text{ tomas} = 249,100 \text{ \$/ año}$$

Se recuerda al lector que, para efectos de la evaluación económica del proyecto de sectorización de la red de agua potable, se debe realizar el análisis a valor presente del costo de reparación de fugas dentro del período de diseño, utilizando ecuaciones similares a las 3.6 y 3.7.

Cuando se trata de montos anuales que se erogan de manera constante durante todo el período de diseño o de análisis, el valor presente se calcula con la *ecuación 3.9*.

$$C_{CF} = f_{F/A,i,N} [C_{CFP}] \quad (3.9)$$

Donde:

C_{CF} = Costo del control de fugas permanente en la red, a valor presente, en \$.

C_{CFP} = Costo anual del control de fugas permanente en la red, en \$.

$f_{F/A,i,N}$ = Factor de serie uniforme - cantidad compuesta, utilizado para obtener una serie de montos uniformes capitalizados a una fecha futura especificada durante un cierto período de N años, a una tasa de interés i ; se calcula con la ecuación 3.7:

$$f_{F/A,i,N} = \frac{(1+i)^N - 1}{i} \quad (3.10)$$

Ejemplo)

Para el ejemplo anterior, si el pago del control de fugas permanente se debe realizar durante 8 años consecutivos, a una tasa de interés del 5%, el monto capitalizado de la serie de los pagos uniformes a valor presente será:

$$C_{CF} = f_{F/A,i,N} [C_{CFP}] = \frac{(1+0.05)^8 - 1}{0.05} [249,100 \text{ \$/ año}] = 2'378,683 \text{ \$}$$

3.5.3 Cálculo de los beneficios económicos de la sectorización de la red

Los beneficios económicos de un proyecto de sectorización se deben analizar con un enfoque integrado hacia el incremento de eficiencia del sistema. Al distribuir el agua potable con sectores en la red se aumenta la eficiencia hidráulica, se provoca una operación más eficiente de los equipos de bombeo y se facilita la reducción de fugas.

Por lo tanto, son tres los beneficios económicos que se producen en forma directa al implementar un proyecto de sectorización de la red: a) Ahorro de agua por la redistribución hidráulica de caudales, b) Ahorro de agua por la reducción de fugas, y c) Ahorro de energía eléctrica en la operación de equipos de bombeo. A continuación, se describen los procedimientos para calcular estos beneficios económicos anuales durante la fase del diseño del proyecto de la sectorización de la red de distribución de agua potable; en los tres casos se utilizan ecuaciones similares a las 3.9 y 3.10, para calcular el monto a valor

presente de la serie de ahorros anuales obtenidos en un cierto período de evaluación.

a) Beneficio por el volumen de agua ahorrado en la redistribución hidráulica de caudales en la red

La evaluación del volumen de agua ahorrado con la redistribución hidráulica de caudales en la red se calcula con la diferencia de los resultados de los balances de caudales, realizados durante la etapa del anteproyecto de la sectorización, antes y después de efectuar el trazo de sectores (incisos 2.5.9 y 2.6.2 del libro). La diferencia de caudal que se obtiene se transforma a volumen anual de producción anual y luego se multiplica por el costo unitario de producción de agua, C_{UPA} (\$/m³), para obtener el beneficio anual de agua ahorrado por la redistribución hidráulica de caudales en la red, B_{RHC} .

Para calcular el costo unitario de producción de agua en las captaciones, se analizan los registros contables del organismo operador del sistema de agua en un período, particularmente se obtienen los costos de operación y mantenimiento de la potabilización, bombeo (en pozos y rebombeos), salarios y prestaciones del personal de la empresa de agua y todos aquellos costos que la empresa de agua debe asumir para asegurar la prestación del servicio. No se deben incluir aquellos costos referentes a otros servicios como son saneamiento y alcantarillado. La suma de los costos se divide entre el volumen de producción de agua total en el mismo período, para obtener el costo unitario de producción de agua.

Ejemplo)

Una ciudad cuenta con un proyecto de sectorización en la zona noroeste de su red de agua potable (ver inciso 2.6.4, caso 1) y desea evaluar los beneficios económicos derivados de la redistribución hidráulica. En los análisis de balances de caudales resultó que, con el trazo actual de la red se requiere suministrar 135.8 L/s, mientras que con el esquema de sectores, el caudal necesario se reduce a 124.8 L/s. Si el costo de producción de agua por los pozos tiene un valor promedio de 2.7 pesos por metro cúbico, determinar el beneficio económico anual por el ahorro de agua en la redistribución hidráulica de caudales.

Solución)

El beneficio por el ahorro de agua en la redistribución de caudales en la red con el esquema de sectorización, resulta de calcular la diferencia de caudales de los balances realizados, transformados a metros cúbicos anuales y multiplicados por costo de agua producida, o sea:

$$B_{RHC} = \frac{(135.8 \text{ L/s} - 124.8 \text{ L/s}) \times 86,400 \text{ s/día} \times 365 \text{ días/año}}{1,000 \text{ litros/m}^3} \times 2.7 \text{ \$/m}^3 = 936,619 \text{ \$/año}$$

No todos los esquemas de sectorización producen ahorros directamente por la redistribución de caudales en la red, pero todos favorecen el equilibrio entre la demanda de agua de los usuarios con el suministro respectivo, e incrementan las horas de servicio en la red. Aunque estos beneficios, además de otros intangibles como las facilidades que proporcionan para el mantenimiento, hacer futuras ampliaciones del sistema, realizar el control operacional hidráulico, son difíciles de cuantificar económicamente, deben exponerse también durante la etapa de evaluación para justificar la viabilidad del proyecto de sectorización.

b) Beneficio por el volumen de agua ahorrado por la reducción de fugas

La reducción de fugas en los sectores de la red de abastecimiento de agua potable impacta directamente en ahorros de agua suministrada. Cierto es que el agua recuperada de las fugas reparadas puede migrar hacia otras zonas de la red con fallas (en sectores aislados físicamente esta migración se evita), o bien, ser consumida por los usuarios que antes de la reparación carecían de la disponibilidad del líquido; no obstante, para efectos de la evaluación de los beneficios económicos es aceptable considerar que el agua de fugas reparadas resulta en un ahorro del agua producida al sector.

El volumen de agua de las fugas reparadas se estima con la ecuación 3.8 para un período específico. Entonces, al multiplicar el volumen de fugas reparadas $V_{FR20\%}$, por el costo unitario de agua producida en el sistema de abastecimiento de agua potable ($\$/m^3$), se obtiene el beneficio económico de la reparación de fugas en los sectores de la red, B_{RF} .

Ejemplo)

Como se vio en el ejemplo del inciso 3.5.2, el volumen de fugas a reducir para alcanzar el 20% del volumen suministrado resultó de 1,962 m³/semana; entonces, el beneficio de la recuperación de este volumen a un costo unitario de 3.2 pesos por metro cúbico será igual a:

$$B_{RF} = V_{FR20\%} \times C_{UPA} = 1,962 \text{ m}^3 / \text{semana} \times 3.2 \text{ \$/m}^3 = 6,278.4 \text{ \$/ semana}$$

c) *Beneficio por la energía eléctrica ahorrada en la operación de equipos de bombeo*

En el diseño hidráulico de la sectorización de la red de distribución, se proponen nuevas condiciones de operación de los equipos de bombeo, para cumplir las condiciones de aprovechamiento óptimo de la red sectorizada (ver inciso 3.2.2.). Esto implica la selección de nuevos equipos de bombeo con curvas características diferentes a los actuales, posibilitando potenciales ahorros en el consumo energético.

Ejemplo)

En un proyecto de sectorización de la red de agua potable de una ciudad, se obtuvieron los resultados mostrados en el Cuadro 3-9. Se observa en las últimas tres columnas del cuadro que los caudales y eficiencias aumentan, pero las cargas disminuyen con el proyecto de sectores, esto implica que hay posibilidades de ahorro de energía al cambiar los equipos de bombeo actuales por los de proyecto.

Cuadro 3-9. Cambio en los caudales, cargas hidráulicas y eficiencia del conjunto bomba-motor con el proyecto de sectorización de la ciudad del ejemplo.

Folio	Nombre	Operación Actual			Operación Proyecto			Diferencias proyecto-actual		
		Gasto	Carga	Eficiencia	Gasto	Carga	Eficiencia	Gasto	Carga	Eficiencia
		(L/s)	mca	%	(L/s)	mca	%	(L/s)	mca	%
1	La India	12.13	175.06	40.49	21.20	171.68	79.30	9.07	-3.38	38.81
2	Lagunilla I	14.56	217.27	35.12	20.16	117.32	79.20	5.60	-99.94	44.08
3	Lagunilla II	13.85	279.69	43.47	14.43	138.43	77.30	0.58	-	141.25

Folio	Nombre	Operación Actual			Operación Proyecto			Diferencias proyecto-actual			
		Gasto	Carga	Eficiencia	Gasto	Carga	Eficiencia	Gasto	Carga	Eficiencia	
		(L/s)	mca	%	(L/s)	mca	%	(L/s)	mca	%	
4	Alta Vista	27.21	324.23	45.70	55.00	166.25	85.60	27.79	-	157.97	39.90

La energía eléctrica ahorrada al optimizar los equipos de bombeo y su sistema electromotriz se calcula con la diferencia del consumo de energía eléctrica en la condición de operación actual, menos el consumo que resulta con el proyecto de sectorización. Aplicando el costo unitario de la energía, se deduce el beneficio económico esperado por ahorro de energía en equipos de bombeo, B_{EEB} .

La potencia que demandará cualquier equipo de bombeo en kilowatts, P_{bomba} , y el costo, C_B , que se paga por la operación en un cierto período, se calculan con las ecuaciones 3.11 y 2.12:

$$P_{bomba} = \frac{9.81 \gamma Q_b H_b}{1000 \cdot \eta_b} \quad (3.11)$$

$$C_B = C_{kw-h} \times P_{bomba} \times N_{hr} \quad (3.12)$$

Donde:

γ = Peso específico del agua, 1,000 kg/m³ para el agua.

Q_b = Caudal, en m³/s.

H_b = Carga dinámica de la bomba, en m.

η_b = Eficiencia entre la potencia entregada al agua y la potencia del motor, en por ciento.

C_{kw-h} = Costo del kilowatt-hora, \$/kw-h.

N_{hr} = Número de horas de operación en el período elegido.

Para calcular los costos de ahorro de energía, por un lado, será necesario realizar pruebas de campo en los equipos de bombeo que operan en condiciones actuales, para medir la eficiencia $\eta_{b-actual}$, el caudal $Q_{b-actual}$ y la carga hidráulica $H_{b-actual}$; y por otro lado, se requerirá contar con las cargas $H_{b-proyecto}$, caudales $Q_{b-proyecto}$ y eficiencias $\eta_{b-proyecto}$ de diseño del proyecto de sectorización de la red.

La disminución de la potencia originada por la sustitución de algún equipo de bombeo ΔP_b , resultado de la optimización hidráulica en el proyecto de sectorización de la red, se calcula con la ecuación:

$$\Delta P_b = P_{bActual} - P_{bProyecto} \quad (3.13)$$

Y por lo tanto, la disminución de la energía eléctrica consumida por el equipo de bombeo se determina con:

$$\Delta E_b = \Delta P_b * N_{hr} \quad (3.14)$$

Finalmente, el dinero ahorrado o beneficio económico esperado por el ahorro de energía eléctrica en equipos de bombeo se calcula con:

$$B_{EEB} = \Delta E_b * C_{kw-h} \quad (3.15)$$

Ejemplo)

Para el equipo de bombeo con folio 1 “La india”, mostrada en el Cuadro 3-9 del ejemplo anterior, calcular el beneficio económico anual esperado por la sustitución del equipo de bombeo, resultante en el proyecto de sectorización. El equipo funciona continuamente durante todo el año y el costo unitario de la energía eléctrica es de 1.58 \$/kw-h.

Solución)

Las potencias de los equipos de bombeo Folio 1, actual y de proyecto se calculan con la ecuación 3.11 (los caudales se transformaron a m³/s), esto es:

$$P_{bActual} = \frac{9.81 \times 1,000 \times 0.01213 \times 175.06}{1,000 \times 0.4049} = 51.45 \text{ kw}$$

$$P_{bProyecto} = \frac{9.81 \times 1,000 \times 0.0212 \times 171.68}{1,000 \times 0.793} = 45.03 \text{ kw}$$

Por lo tanto, al aplicar la ecuación 3.13 resulta que la disminución de potencia de bombeo es igual a:

$$\Delta P_b = 51.45 - 45.03 = 6.42 \text{ kw}$$

Y el ahorro de energía eléctrica consumida en un período de un año se determina con la ecuación 3.14, como sigue:

$$\Delta E_b = 6.42 \text{ kw} \times 365 \text{ días / año} \times 24 \text{ hr / día} = 56,239 \text{ kw-h / año}$$

Al multiplicar por el costo del kilowatt-hora se obtiene el ahorro económico por la sustitución del equipo de bombeo, es decir:

$$B_{EEB} = 56,239 \text{ kw-h} \times 1.58 \text{ $ / kw-h} = 88,858 \text{ $ / año}$$

Quando sucede que en el proyecto de sectorización algunos equipos de bombeo quedan fuera de operación, debido a que el suministro de agua excede la demanda de los usuarios, el ahorro de energía eléctrica correspondiente se calcula simplemente sumando los costos de las facturas de energía eléctrica existentes en el organismo operador, reportadas por la compañía que suministra la electricidad al sistema de agua potable.

Ejemplo)

El beneficio económico por el ahorro de energía eléctrica debido al paro definitivo de equipos de bombeo, obtenido en un proyecto de sectorización de la red de agua potable de una ciudad, se muestra en el Cuadro 3-10.

Cuadro 3-10. Beneficios económicos por el ahorro de energía por el paro definitivo de equipos de bombeo en un ejemplo de diseño de red sectorizada.

Equipos que pararán	Facturación CFE Actual		Facturación CFE Proyecto		Ahorros	
	kWh/año	\$/año	kWh/año	\$/año	kWh/año	\$/año
R. La Ermita	269,160	578,674.93	0	0.00	269,160	578,674.93
R. Guadalupe	811,936	913,825.17	0	0.00	811,936	913,825.17
R. Borjas	320,240	407,027.97	0	0.00	320,240	407,027.97
20 de noviembre	7,106	30,955.68	0	0.00	7,106	30,955.68
<i>Total</i>					3,798,517	4,563,819.52

Existen otros beneficios económicos por el ahorro de energía eléctrica en equipos de bombeo, derivados de la operación hidráulica resultante en el proyecto de sectorización de la red de agua potable, como los que se obtienen con el paro de bombas en hora punta o la instalación de variadores de velocidad, sin embargo, por su extensión están fuera de los alcances del libro, pero pueden ser consultados en el manual de eficiencia editado por la Comisión Nacional del Agua, en colaboración con el personal del programa Watergy de México (Ref. 3.11).

3.5.4 Cálculo del beneficio-costo de la implementación del proyecto de sectorización de la red de agua potable

Como se mencionó al inicio de este capítulo, la evaluación económica de la implementación del proyecto de sectorización en una red de distribución de agua potable se determina comparando los beneficios contra los costos, a valor presente, que se tendrán a lo largo del período de diseño establecido en la fase de planeación.

El cálculo de la relación beneficio (B) – costo (C) de la implementación de un proyecto de sectorización para un cierto período de diseño, se realiza con la ecuación siguiente:

$$\frac{B}{C} = \frac{B_{RHC} + B_{RF} + B_{EEB}}{C_{IS} + C_F + C_{CFP}} \quad (3.16)$$

Las variables de la ecuación 3.16 han sido definidas previamente en el presente inciso. Cuando la relación beneficio costo resulta mayor o igual que la unidad, entonces el proyecto de sectorización es viable económicamente, es decir:

$$\frac{B}{C} \geq 1 \Rightarrow \text{Proyecto de sectorización viable económicamente} \quad (3.17)$$

Ejemplo)

Se desea evaluar económicamente la implementación de un proyecto de 15 sectores en una red de agua potable, para definir la viabilidad de las inversiones programadas que se muestran en el Cuadro 3-11, además de un costo anual de \$ 1'050,00 por la actividad del control permanente de fugas. La tasa de interés se ha determinado que será del 7% anual y el período de análisis es de 10 años.

Cuadro 3-11. Inversiones programadas para implementar sectores del ejemplo.

Año	Construcción de sectores (\$)	Reparación de fugas (\$)	Sustitución de equipos de bombeo (\$)	Costo anual del control de fugas (\$)	Inversión total (\$)
0	Gestión de recursos, licitación y contrato				
1	11'500,00	2'300,000	550,000	1'050,000	15'400,000
2	9'800,000	1'900,000	220,000	1'050,000	12'970,000
3	2'900,000	640,000	0	1'050,000	4'590,000
TOTAL	24'200,000	4'840,000	770,000	...	32'960,000

Los beneficios económicos anuales que se espera obtener en el segundo año se muestran en el Cuadro 3-12.

Cuadro 3-12. Beneficios económicos acumulados al implementar los sectores del ejemplo.

Año	Por redistribución de caudales (\$)	Por reducción de fugas (\$)	Por sustitución y/o paro de equipos de bombeo (\$)	Beneficio total (\$)	Observaciones
0	Gestión de recursos, licitación y contrato				
1					Implementación de 7 sectores
2	610,000	1'210,000	1'300,000	3'120,000	Implementación de 5 sectores
3	1'090,000	2'160,000	2'380,000	5'630,000	Implementación de 3 sectores
4	1'370,000	2'700,000	2'950,000	7'020,000	
5

Solución)

La escala de tiempos de inversiones y beneficios se muestra en la Figura 3-36.

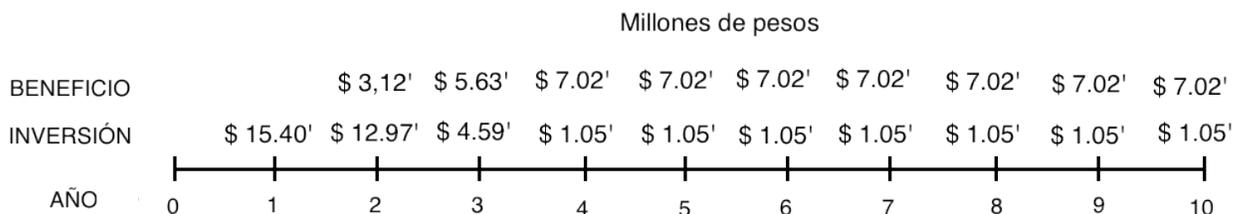


Figura 3-36. Escala de tiempos de inversiones y beneficios del ejemplo.

Ahora bien, los beneficios y costos se transforman a valor presente aplicando las ecuaciones 3.6, 3.7, 3.9 y 3.10, como sigue:

$$C = f_{F/P,0,07,1}[15.40] + f_{F/P,0,07,2}[12.97] + f_{F/P,0,07,3}[4.59] + f_{F/A,0,07,7}[1.05] \times f_{F/P,0,07,3}$$

$$B = f_{F/P,0,07,2}[3.12] + f_{F/P,0,07,3}[5.63] + f_{F/A,0,07,7}[7.02] \times f_{F/P,0,07,3}$$

Sustituyendo valores se obtiene el costo y el beneficio a valor presente, es decir:

$$C = (1+0.07)^1[15.40] + (1+0.07)^2[12.97] + (1+0.07)^3[4.59] + \frac{(1+0.07)^7 - 1}{0.07}[1.05] \times (1+0.07)^4 = 48.85' \$$$

$$B = (1+0.07)^2[3.12'] + (1+0.07)^3[5.63'] + \frac{(1+0.07)^7 - 1}{0.07}[7.02'] \times (1+0.07)^4 = 90.1' \$$$

Por lo tanto, la relación beneficio costo es:

$$\frac{B}{C} = \frac{90.10'}{48.85'} = 1.84 > 1 \Rightarrow \text{El proyecto de sectores del ejemplo es económicamente viable}$$

Otra forma de representar en el ejemplo el flujo de dinero de la implementación del proyecto de sectores en la red se muestra en el Cuadro 3-13, donde para cada año se calcula la diferencia entre los costos y beneficios con su equivalencia a valor presente.

Cuadro 3-13. Flujo de dinero a valor presente en la implementación del proyecto de sectores en la red del ejemplo.

Año	inversiones \$x10 ⁶	Inversión a VP \$x10 ⁶	beneficios \$x10 ⁶	Beneficio a VP \$x10 ⁶	Flujo Neto \$x10 ⁶	Flujo Neto a valor presente \$x10 ⁶
0	0	0.00	0	0.00	0.00	0.00
1	15.4	16.48	0	0.00	-15.40	-16.48
2	12.97	14.85	3.12	3.57	-9.85	-11.28
3	4.59	5.62	5.63	6.90	1.04	1.27
4	1.05	1.38	7.02	9.20	5.97	7.83
5	1.05	1.47	7.02	9.85	5.97	8.37
6	1.05	1.58	7.02	10.54	5.97	8.96
7	1.05	1.69	7.02	11.27	5.97	9.59
8	1.05	1.80	7.02	12.06	5.97	10.26
9	1.05	1.93	7.02	12.91	5.97	10.98
10	1.05	2.07	7.02	13.81	5.97	11.74
TOTAL		48.86		90.10	17.58	41.24

Se deduce también del cuadro que el tiempo de la recuperación de los costos del proyecto suceden en el año tres, cuando el flujo neto a valor presente se vuelve positivo.

Cuando el resultado de la relación Beneficio-Costo sea menor que la unidad, entonces se deberán considerar otros beneficios no cuantificables monetariamente, antes de desecharlo completamente. Al respecto, existen otros métodos como el de Costo- Utilidad, que se utilizan cuando los beneficios tienen orígenes subjetivos, tales como los que provoca la sectorización de la red en la ampliación de la red: la protección al medio ambiente, el desfase de construcción de nueva infraestructura, el incremento de la continuidad del servicio a los usuarios, conservación de fuentes de abastecimiento locales, menores emisiones de CO₂, mejor imagen institucional, aumento de la calidad del agua entregada a usuarios, y más disponibilidad en cantidad y presión. etc. En el método se trata de categorizar los diferentes estados de la realidad de acuerdo a la visión de mejora de una situación, estableciendo categorías dentro de ellas de modo que se ordenen de mejor a peor y asignando valores numéricos a estas categorías, a partir de la que se considere óptima (Ref. 3.12).

Existen otros indicadores de evaluación económica de proyectos, como el *Valor Actual Neto*, *VAN*, que consiste en determinar el valor presente de los flujos de efectivo futuros (costos y beneficios) derivados del proyecto de sectorización de la red de agua potable, utilizando una tasa de descuento i y dentro del período de diseño N . También, la Tasa interna de retorno TIR, que permite determinar el valor de la tasa de retorno para que los costos y beneficios sean iguales, que pueden ser consultados en la bibliografía relacionada con ingeniería económica y financiera. No obstante, para la evaluación de la implementación de un proyecto de sectorización de la red de agua potable, basta con utilizar la relación beneficio – costo, ya que arroja resultados suficientes para decidir su viabilidad económica.

Un factor importante en la evaluación económica es el costo del agua. Aquí solo se está considerando el costo de producción de agua en las captaciones, que normalmente es inferior al costo de venta del agua, lo cual implica mayores beneficios económicos para el proyecto de sectorización de la red de agua potable.

Bibliografía

- [3.1] Technical Working Group on Wase of Water, (1980), Leakage Control Policy & Practice, (Report 26), National Water Council UK Water Authorities Association.
- [3.2] Wallace L. (1987), Water and Revenue Losses: Unaccounted for Water, Research Report Fundation december, Denver, AWWA.
- [3.3] CONAGUA (2007), Sectorización de redes de agua potable, México, 2007.
- [3.4] Riggs J., Bedworth D., Randhagwa S., 2005, Ingeniería Económica, 4ª edición, Alfaomega, México.
- [3.5] Cahudhry H. , Yevjevich V., (1981), “Closed Conduit Flow”, Water Resources Publications, PO Box 2841, Littleton Colorado, USA.

Referencias

- [3.1] Izquierdo J. et al. 2003, “Análisis de redes en régimen permanente”, Ingeniería Hidráulica en los Abastecimientos de Agua, Capítulo 9, GMF, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [3.2] Martínez F., 2002, Epanet 2.0 en español. Manual de Usuario. Departamento de Ingeniería Hidráulica, UPV.
- [3.3] Ochoa L., 2010, Fortalecimiento técnico a empresas de agua potable con modelos de simulación hidráulica de redes, Publicado en el Seminario SEREA 2010, Morelia, México, UPV-UMSNH.
- [3.4] Cabrera E., et al, 1996, Ingeniería Hidráulica aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua, Capítulo 7, Editado por la Universidad Politécnica de Valencia, segunda edición, España.
- [3.5] Bhave P.R., 1988, Calibrating Water Distribution Networks Models. Journal Enviroment Eng. ASCE, Vol. 114.
- [3.6] Walski T. M., 1983, Technique for calibrating network models. Journal of Water Resources Planning an Mangement, ASCE, Vol. 109.
- [3.7] Tzatchkov V., 2007, Redes de Distribución, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Comisión Nacional del Agua, México.
- [3.8] Ochoa L. et al, 2003, Datos básicos, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Comisión Nacional del Agua, México; actualizado por Tzatchkov en 2007.
- [3.9] Hueb J. A. (1985), Control de fugas en los sistemas de distribución de agua potable, Manual DTIA, No. C-7, Lima Perú, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente-CEPIS.
- [3.10] Ochoa L. (2005), Planeación de acciones de incremento y control de la eficiencia en sistemas de agua potable, Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana, CONAGUA, México.
- [3.11] Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable, Comisión Nacional del Agua - Watergy, Nov. 2009, México.
- [3.12] Abalza, M. (2006): Evaluación económica de proyectos de cooperación, Editorial Hegoa, diciembre, Bilbao.

Proyectos de referencia

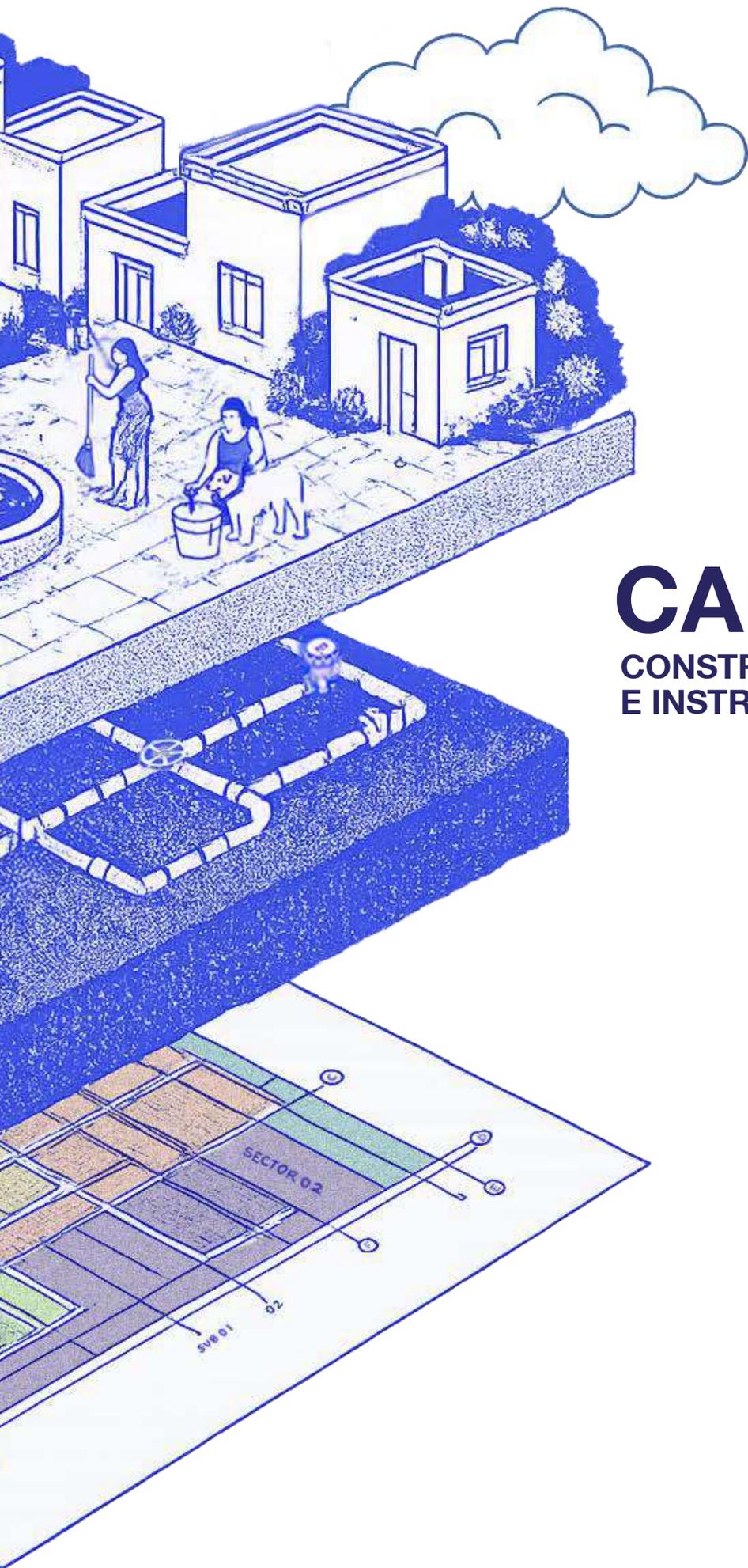
- [3.1] “Eficiencia física y de la operación hidráulica de la red de agua potable de Zihuatanejo” Comisión de Agua potable y alcantarillado de Zihuatanejo, CAPAZ-SHIPSA, Junio de 2006, México.
- [3.2] “Modelación de la red de distribución de agua potable y rediseño de distritos hidrométricos de la delegación Iztapalapa, SACM-SHIPSA, Diciembre de 2011, México.

[3.3] “Modelación Hidráulica Del Sistema De Agua Potable De Ciudad Valles, S. L. P.” Modelos Actual y de Proyecto, DAPA-SHIPSA, Dic. 2010, México.

[3.4] “Proyecto Ejecutivo de sectorización de redes en la cabecera municipal de Acámbaro, Guanajuato” Anexo K-Planos ejecutivos, JUMAPA Acámbaro-SHIPSA, Jul. 2009, México.

[3.5] “Proyecto de Sectorización y Eficiencia de la Red de Agua Potable de la Ciudad de Celaya, Gto.” Anexo D.5.a. Planos de la red sectorizada de proyecto, JUMAPA Celaya-SHIPSA, Sep. 2010, México.

[3.6] “Estudio en Fuentes de Abastecimiento para el Ahorro de Energía Eléctrica” en el Municipio de Cuernavaca, Morelos, SHIPSA-SAPAC, Octubre 2009, México.



CAPÍTULO 4

CONSTRUCCIÓN E INSTRUMENTACIÓN

4.1 CONCEPTOS DE CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE

La construcción de sistemas de agua potable es el proceso que se lleva a cabo para realizar las obras especificadas en los planos de diseño ejecutivo y ponerlas en operación. Es muy diversa la actividad de construcción de los sistemas de agua potable, ya que se realizan perforaciones de pozos y galerías, se forman diques, presas, obras de toma, se instalan líneas de conducción y redes de distribución, se erigen tanques de regulación en concreto, acero y mampostería, se instalan equipos electromecánicos y accesorios, etcétera.

El proceso de la construcción de sistemas de distribución de agua potable, al igual que muchas de las obras de ingeniería civil, implica muchas actividades de tipo técnico, administrativo, social, político y económico, entre las que se pueden mencionar las siguientes:

- Gestión de los recursos económicos y financieros para solventar la inversión de las obras del proyecto de construcción.
- Integración de las bases de concurso para seleccionar la compañía que ejecutará las obras, que incluye especificaciones, catálogo de conceptos, planos y programas de trabajo.
- Obtención de permisos legales de espacios públicos, afectaciones, tránsito y seguridad.
- Realización del concurso de selección de la empresa que cumpla con los requerimientos establecidos en la licitación.
- Instalación de residencia de construcción y almacén de materiales, equipos y herramientas.
- Registro de personal de construcción y supervisión en instituciones de seguridad social.
- Ejecución de obras de demolición de piso, excavación, instalación y acoplamiento de tuberías, relleno y pavimentación.
- Realización de cajas de tabique y concreto para alojamiento de válvulas, medidores y accesorios.
- Instrumentación e instalación de equipos especiales, bombas y tableros de control.
- Solución de imprevistos por afectaciones a la operación de la red de agua potable y a otros servicios públicos como teléfono, gas, energía eléctrica y vialidades.
- Pruebas de operación hidráulica, hermeticidad, funcionamiento mecánico y eléctrico los sistemas de bombas, tuberías y medidores.
- Limpieza y acabado final de obras y sitios.
- Supervisión del cumplimiento y calidad de las obras ejecutadas (bitácoras y minutas de obra)
- Reportes de avances físicos y financieros, así como el cobro y pago de estimaciones respectivas.
- Actualización de planos, según el estado final de las obras terminadas.
- Entrega de obra, transferencia y capacitación al personal de operación.

Particularmente, en la construcción e instrumentación de un proyecto de sectorización de la red de agua potable, el proceso de construcción se complica debido a que se trata con obras que modifican la operación normal del sistema. Desde el punto de vista de la ingeniería la separación de la red en sectores no implica grandes dificultades, puesto que son obras menores: cortes de tuberías, reconexiones, cajas de válvulas, sustitución de tuberías, etc. Pero, desde la perspectiva de la operación del sistema, la implementación de la sectorización de la red se vuelve muy compleja, ya que se producen cambios radicales en el funcionamiento de la red, que rompen esquemas tradicionales y rutinarios de los operadores, modificando políticas de trabajo preestablecidas y repercutiendo en grandes confusiones y reacciones negativas a la aceptación de esta forma de funcionamiento del sistema de distribución de agua.

Por ello, es recomendable que en la etapa de construcción e instrumentación de los sectores se contemple dentro de los compromisos de la empresa constructora, la participación intensiva de las áreas técnica, comercial y de operación del organismo operador y se prevengan actividades de transferencia, capacitación y entrenamiento hacia el personal correspondiente.

En este capítulo 4 del libro se describe solo el proceso técnico de la implementación física del proyecto de sectorización de la red de agua potable. A grandes rasgos, el proceso se ha clasificado en tres principales actividades: a) Verificación en campo del diseño y confirmación de obras a ejecutar; b) Ejecución de obra civil; c) Instrumentación y equipamiento.

4.2 VERIFICACIÓN DEL DISEÑO EN CAMPO Y PROGRAMACIÓN DE OBRAS A EJECUTAR

La inspección de los sitios de construcción con recorridos de campo son una buena práctica antes de proceder a la ejecución de las obras, pues a partir de esto se puede confirmar o corregir los planos de la red, prever la construcción de obras adicionales y problemas asociados a la operación hidráulica propuesta en el diseño de sectores. La inspección y corrección del diseño permitirá elaborar el programa de la ruta crítica de ejecución de sectores, para tener el control de la ejecución de los trabajos de sectorización de la red.

El uso en sitio de una computadora portátil con el modelo de simulación hidráulica del proyecto de los sectores y con los planos ejecutivos en archivo digital e impresos, agiliza la revisión y se vuelve más fácil el ajuste y la corrección de los detalles de diseño de sectores de la red en relación a los imprevistos y problemas localizados durante los recorridos de campo.

En este subcapítulo se muestran los procedimientos recomendados para verificar en campo el diseño del proyecto de sectorización en campo, adecuarlo a las condiciones existentes en el lugar y asegurar el éxito de la construcción de las obras en tiempo y costo.

4.2.1 Ubicación y levantamiento en campo de sitios de obra

Para dar inicio a la ubicación y levantamiento en campo de sitios de obra, se imprimen los planos ejecutivos para apreciar sin dificultad los detalles de la red de distribución, los límites de cada sector y los sitios donde se harán las obras.

Luego, se identifican en los planos las estructuras de captación, regulación y líneas de conducción que darán servicio al sector, y se efectúa una visita por estos lugares. Aunque se disponga de las fichas técnicas de estas estructuras, siempre es necesario hacer estos recorridos de verificación y reconocimiento.

Posteriormente, con recorridos de campo por los límites de cada sector se ubican físicamente los sitios donde, de acuerdo con el diseño, se harán las obras de cortes, conexiones, instalación de tuberías y válvulas, necesarias para su aislamiento. Esta actividad es muy importante, pues en muchas ocasiones las obras que se requieren realizar para el aislamiento de los sectores no se pueden llevar a cabo; ya sea por las condiciones físicas del sitio, por provocar afectaciones importantes en el lugar (por ejemplo, en cruces con otros servicios como el teléfono, gas, etc.), porque no se localizan las cajas de válvulas o porque simplemente existen tuberías diferentes a las indicadas en el plano. Esto puede ocasionar la

ejecución de obras adicionales o modificaciones al límite del sector y, por lo tanto, un diseño y análisis hidráulico corregido debido a estos imprevistos.

Entonces, si en los límites de los sectores se han propuesto cortes de tuberías o instalación de válvulas de seccionamiento, se localizan todas las cajas de válvulas y se hace su levantamiento físico y detalle del crucero, tal y como se indicó en *inciso 2.3.2.2*. Se recuerda que esta tarea consiste en dibujar las tuberías, válvulas y piezas especiales indicando sus características principales, como son: diámetros, materiales, tipo de válvulas y nombre de piezas especiales. No hay que olvidar que es necesario representar los cruceros con la simbología respectiva, tomar fotos y anotar observaciones respecto al estado físico de las cajas y elementos que conforman el crucero. Además de reconocer los límites físicos del sector, esta actividad de reconocimiento del sitio servirá para comprobar y/o retroalimentar la información de los planos de la red, verificar y corregir el diseño hidráulico del sector, y hacer ajustes en la cuantificación de las obras antes de su ejecución.

Ejemplo)

En la Figura 4-1 se presentan algunos ejemplos de los problemas que pueden encontrarse durante los recorridos de campo e inspección de sitios de las obras; en estos casos deberán considerarse trabajos de construcción adicionales como desazolve, nivelación de cajas, entre otros.



Figura 4.1.a. Caja de válvulas tapada por reposición de pavimento.



Figura 4.1.b. Caja azolvada con tierra e inundada.

Figura 4-1. Problemas típicos que se presentan durante los recorridos de inspección en campo de las obras que se modificarán según el diseño de la sectorización de la red de agua.

Después de revisar los límites de los sectores, se hace una verificación similar de las cajas de válvulas en el interior de los sectores y se anotan las condiciones existentes y aquellas que impliquen impedimentos o adecuaciones importantes para ejecutar las obras del diseño sobre cortes de tuberías, conexiones, instalación de válvulas de seccionamiento y sustitución o instalación de tuberías. Es importante, por lo tanto, localizar las líneas de fibra óptica, drenajes, líneas telefónicas o cualquier cableado subterráneo que puedan ocasionar complicaciones durante la construcción de las obras de sectorización.

Una vez inspeccionados los sectores en cuanto a obras de corte, reconexión e instalación de tuberías y válvulas, se procede a identificar los lugares donde se instalarán las válvulas de control automático y los medidores de flujo recomendados en el diseño. Es necesario que se observen muy bien estos lugares y que se verifique que no haya ningún inconveniente para su ejecución, pues de lo contrario se deberán hacer los ajustes al diseño para adecuarlo a las condiciones de campo. Respecto a la instalación de válvulas automáticas, se requiere determinar el lugar exacto por donde pasan las tuberías en las que se colocarán estos accesorios y revisar una caja aguas abajo y aguas arriba del lugar de la instalación para verificar el diámetro del tubo. Esto también ayuda en la corrección y/ actualización del plano de la red.

4.2.2 Adecuaciones al diseño original resultantes de las inspecciones de campo

Después de hacer los recorridos de campo por los sectores y detectar los problemas respecto a la ejecución de las obras propuestas en el diseño original de la sectorización de la red, se proponen soluciones constructivas y se realiza la modificación correspondiente en dicho diseño. Se procede como sigue.

Primero, se actualizan los planos del proyecto de la sectorización de la red de agua potable, en relación con las diferencias encontradas durante los recorridos de campo. Luego, se representan estos cambios en el modelo de simulación hidráulica de la red de proyecto y se hacen corridas para revisar si se cumple con las especificaciones de caudal y presión. En caso de que las modificaciones no alteren el comportamiento hidráulico general de los sectores, entonces no habrá ningún problema para continuar con la ejecución de las obras. Pero si se llegarán a detectar problemas de funcionamiento hidráulico en alguno de los sectores, se tendrán que hacer propuestas de solución y corregir el diseño hidráulico original.

Ejemplo)

En la Figura 4-2 se presenta el plano de diseño de un sector de proyecto con 10,356 habitantes, en la red de una ciudad. En el diseño original se propone que el sector sea abastecido de agua por gravedad, desde un tanque de 1,000 metros cúbicos de capacidad y con un caudal disponible de 50 L/s. El caudal máximo horario demandado por los usuarios resultó de 39.4 L/s, con un volumen mínimo requerido para regularlo de 428 metros cúbicos.

En este ejemplo, el origen del problema al diseño original del sector se presenta cuando en los recorridos de campo no se localiza la caja de válvulas, para realizar el corte de tubería y aislar dicho sector en su límite sur. Esto afecta los términos de contratación para la ejecución de las obras, ya que no se contemplan conceptos de excavación o sondeo para localizar tuberías.



Figura 4-2. Vista general del diseño de un sector de la ciudad del ejemplo.

En la Figura 4-3 se muestra el modelo de simulación hidráulica del sector del ejemplo en el programa Epanet V 2.0, con los resultados de presión y caudal que se obtuvieron en el diseño.

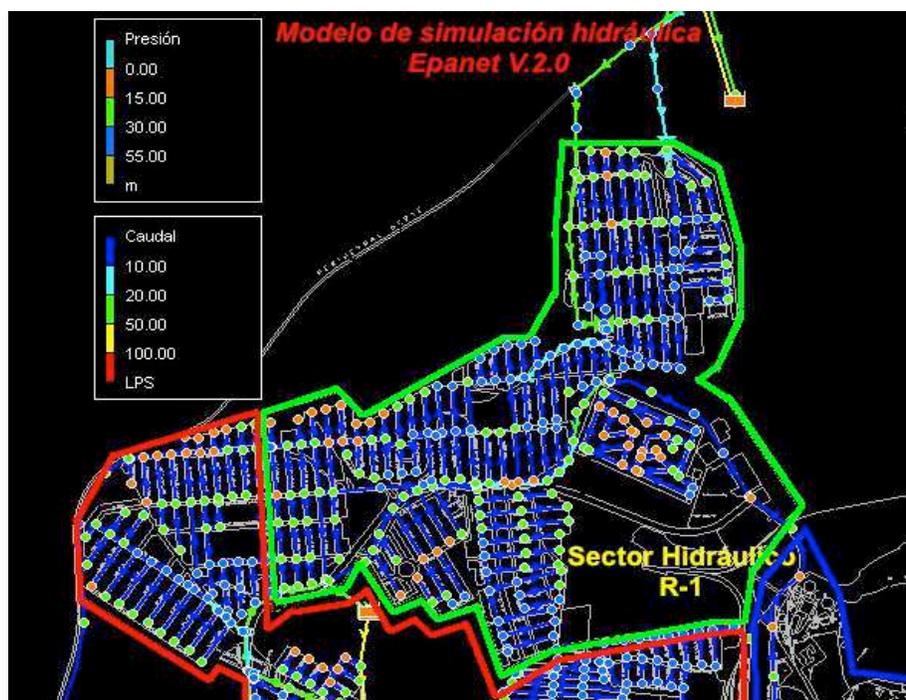


Figura 4-3. Modelo de simulación hidráulica del diseño original del sector de la ciudad del ejemplo.

Con base en esta situación, se toma la decisión de ampliar el área del sector, con la salvedad de verificar en el diseño el funcionamiento hidráulico. Por consiguiente, se revisa en el modelo de simulación si el caudal disponible de 50 L/s puede cubrir el caudal demandado por los usuarios, debido

la ampliación del sector, además de comprobar que las presiones en la red cumplan las especificaciones y el tanque sea tenga capacidad de regular el gasto máximo horario.

En las Figura 4-4 y Figura 4-5 se muestra el plano del sector de proyecto con el límite sur ampliado y los resultados del modelo de simulación hidráulica, respectivamente. Es importante señalar que las revisiones, análisis y modificaciones se hacen también para el otro sector colindante, que reduce su área por la ampliación del sector hidráulico de este ejemplo.



Figura 4-4. Plano del sector de proyecto ampliado en su diseño original, en la ciudad del ejemplo.



Figura 4-5. Resultados de caudal y presión en el modelo de simulación hidráulica del sector ampliado en su diseño original, de la ciudad del ejemplo.

En este nuevo diseño con el sector ampliado a 12,266 habitantes, resulta un caudal máximo horario de 46.7 L/s y un volumen mínimo de regulación de 512 metros cúbicos, los cuales son menores al caudal disponible de 50 L/s y capacidad del tanque de 1,000 metros cúbicos, respectivamente. Se observa también en los resultados del modelo que las presiones en la red cumplen con las especificaciones recomendadas, por lo tanto, la ampliación del sector facilita la realización de la obra de aislamiento y se acepta el nuevo diseño hidráulico en el proyecto de sectorización de la red.

4.2.3 Programación de las actividades para la ejecución de obra

En la implementación de la sectorización de la red de agua potable siempre es necesario programar las actividades de ejecución de obra. Las actividades de obra civil, equipamiento, instrumentación y pruebas de aislamiento, requieren de un estricto control de ejecución, tanto a nivel técnico, como de asignación de recursos humanos, materiales y financieros.

Para realizar una correcta programación de la implementación de sectores en la red, se elabora un programa de Ruta Crítica, que es una técnica eficaz en la planeación y administración de construcción de todo tipo de proyectos. En esencia, el programa de Ruta Crítica es la representación del plan de ejecución del proyecto en un diagrama, que describe la secuencia e interrelación de las actividades y componentes del proyecto, así como las actividades que controlan el tiempo de construcción.

Para elaborar la ruta crítica, se determinan primero las actividades y secuencias de ejecución de cada sector y enseguida se organiza la ejecución de sectores de forma general en función de la ubicación, tamaño y cantidad de obras por ejecutar en cada uno de ellos, con la condición de afectar lo menos posible a los usuarios.

Los diagramas individuales de cada sector hidrométrico se conforman en función de las actividades que se derivan del catálogo de conceptos de las bases de concurso (incluidas las que fueron modificadas en los recorridos de campo) y según los rendimientos de los recursos humanos que se destinan para su ejecución. Es muy importante considerar también todas las actividades para la gestión administrativa y el suministro de materiales y equipos.

Ejemplo)

En la Figura 4-6 se muestra el ejemplo de un diagrama de flechas de Ruta Crítica, elaborado para implementar un sector hidrométrico de proyecto, la red de una ciudad. Se observa que hay una serie de actividades críticas cuyo retraso individual afecta todo el tiempo de ejecución de la obra completa.



Figura 4.6.a. Simbología del diagrama de flechas.

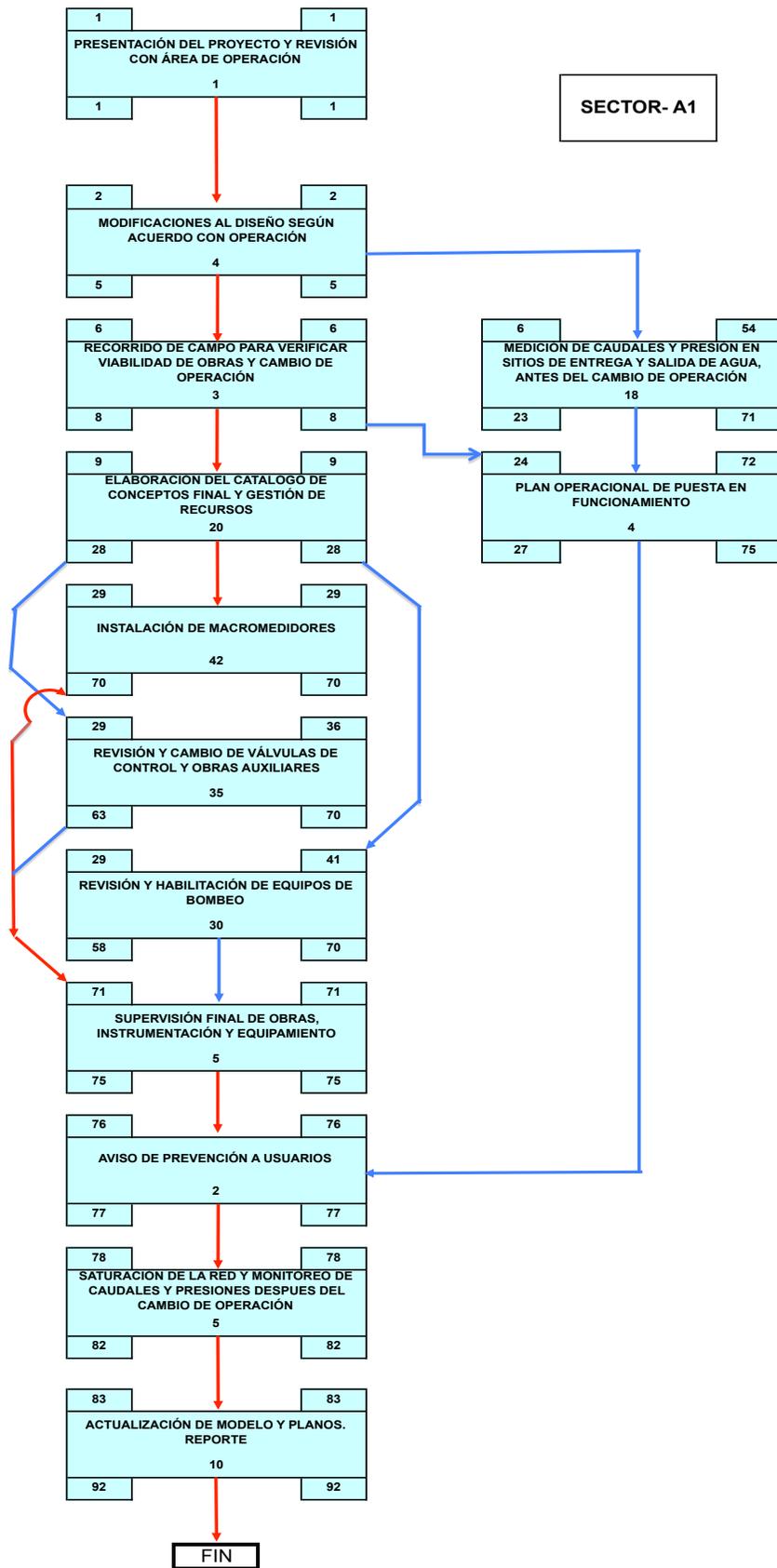


Figura 4-6. Ejemplo de diagrama de flechas de Ruta crítica, elaborado para la implementar un sector hidrométrico de proyecto en la red de una ciudad.

El principal factor que determina la programación e implementación del proyecto es la capacidad del organismo operador del sistema de agua potable para disponer de recursos económicos y, de la efectividad, experiencia, capacidad técnica y financiera de la empresa en este tipo de proyectos. Estas capacidades definirán si la implementación se realizará de manera lineal, sector por sector, o de manera paralela, implementando varios sectores a la vez.

A partir del diagrama de flechas de cada sector, se elabora un diagrama de flechas global de la implementación de todo el proyecto de sectorización de la red de agua potable. A partir de este diagrama, se conforma un calendario global de actividades, con fechas definidas para la ejecución de todos los sectores, identificando los periodos de inicio y terminación de obras y los períodos en que zonas específicas de la red podrían quedarse sin servicio, por la ejecución de las obra y pruebas de aislamiento. Con esta información se programarán avisos oportunos a los usuarios para que puedan tomar previsiones.

Ejemplo)

En la Figura 4-7 se muestra el calendario que resulta para la ejecución global de los siete sectores del proyecto en la red de la ciudad del ejemplo. En este caso particular, se observa que los sectores serán implementados uno a uno.

ANO	ANO 1												ANO 2																																																			
MES	1			2			3			4			5			6			7			8			9			10			11			12			13			14			15			16																		
SEMANA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
SEMANA PROGRESIVA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
SECTOR- A1																																																																
SECTOR- A2																																																																
SECTOR- B1																																																																
SECTOR- B2																																																																
SECTOR- B3																																																																
SECTOR- B4																																																																
SECTOR- B5																																																																

Figura 4-7. Calendario global para la implementación de todo el proyecto de sectorización de la red de agua potable de la ciudad del ejemplo.

Este tipo de diagramas y calendarios también pueden elaborarse con programas de cómputo especializados en el tema, por ejemplo: Opus, Neodata o Microsoft Office Project.

4.3 EJECUCIÓN DE OBRA CIVIL

La experiencia de los organismos operadores de agua potable que han emprendido la sectorización de sus redes reconocen que éstas obras son dinámicas. Así como se considera que aún en las redes de agua potable mejor gestionadas siempre existirá un nivel de fugas inevitable, también la implementación de los proyectos de sectorización de la red siempre será dinámica en su etapa de construcción. Es justamente durante la ejecución de las obras que se encuentran diferentes alternativas de solución en la construcción, para lograr los objetivos hidráulicos originalmente diseñados. Solo hay que tener en cuenta que las soluciones hidráulicas diseñadas no cambien, la dinámica se presenta en el “cómo” se ejecutan y construyen los cortes, conexiones y ampliaciones de tuberías, así como las variantes en la forma de instrumentar e instalar los equipos y accesorios.

Durante la etapa constructiva se busca ejecutar las obras de sectorización de la red, reduciendo al máximo las afectaciones a los ciudadanos y usuarios; para ello, una campaña informativa siempre ayudará a reducir el efecto negativo en los usuarios y conservar la imagen institucional de la empresa de agua. Para reducir las afectaciones es clave la coordinación e interacción entre los diferentes equipos de

trabajo del organismo operador y con los de la empresa constructora, especialmente para cerrar válvulas y/o suspender el servicio. Ello, además de cuidar la imagen institucional y minimizar las afectaciones a los usuarios del sistema, reduce el tiempo de ejecución de las obras e induce la efectividad de los trabajos.

Para agilizar la toma de decisiones ante eventualidades en la infraestructura encontrada (diferente a lo establecido en los planos ejecutivos) se recomienda preparar stocks de materiales y piezas especiales en la residencia de campo. Asimismo, siempre es conveniente disponer en una computadora portátil el modelo de simulación hidráulica del diseño de sectores, para evaluar “*in situ*” las adecuaciones y alternativas que surjan inesperadamente en la obra. En este sentido, se recomienda mantener un trabajo cercano y fluido entre el equipo de construcción y el equipo de diseño de la sectorización de la red.

La documentación de las modificaciones en la red además de ayudar a la simulación hidráulica “*in situ*” asegurará el uso del modelo como la principal herramienta de operación del sistema de agua potable completo.

4.3.1 Generalidades constructivas

Las obras civiles para sectorizar redes de agua potable siempre llevan una carga de molestia y afectaciones para los ciudadanos que transitan por la ciudad y para los usuarios del servicio. La sectorización de redes de agua potable tendrá un mayor éxito si las obras civiles de los diferentes sectores se ejecutan simultáneamente y en el menor tiempo posible. Por ello, se emprende una campaña informativa que minimice el impacto de la sectorización a la vida rutinaria de la ciudad.

La campaña informativa suele reducir el efecto negativo de las obras de sectorización de la red en los ciudadanos y protege la imagen institucional de la empresa de agua ante los inconvenientes que se podrán generar hacia los ciudadanos. Esta campaña puede realizarse mediante la colocación de mantas informativas en puntos estratégicos de los sectores, spots informativos en medio de comunicación como radio y televisión y desplegados en periódicos locales. El perifoneo es muy recomendado para avisar a los usuarios sobre la suspensión temporal del servicio.

Para aumentar la eficiencia de los trabajos de sectorización de la red, es importante ejecutar las obras involucrando y comprometiendo a los diferentes equipos del organismo operador agua que intervendrán directa o indirectamente en la construcción de los sectores. También, se recomienda asignar adecuada y claramente las competencias y responsabilidades de: suministro de materiales, suspensión de servicio, cierre de válvulas, construcción de obra civil, fontanería y pailería, reposición de pavimentos, operación de maquinaria pesada e incluso comunicación y atención ciudadana.

Ejemplo)

En la Figura 4-8 se muestran ejemplos de escenas donde el bombeo de achique es infructuoso, producido por falta de equipo suficiente y/o descoordinación en la suspensión del servicio y/o cierre de válvulas de seccionamiento. Asimismo, en la misma figura se visualiza la presencia de flujos fuera de control que provocan condiciones de riesgo laboral, retrasan y dificultan las obras, produciendo elevadas pérdidas de agua y generando una mala imagen del organismo operador agua.



Figura 4.8.a. Ejemplo 1.



Figura 4.8.b. Ejemplo 2.



Figura 4.8.c. Ejemplo 3.

Figura 4-8. Ejemplos de bombeo de achique ineficaz durante la construcción de obras de sectorización de la red.

Siempre el equipo de construcción deberá establecer estrategias para que los trabajos de sectorización de la red se vuelvan más efectivos y se reduzcan los costos asociados. Una estrategia adecuada puede ser la de construir primero todas las cajas de válvulas que alojarán cortes, reconexiones y ampliaciones de tuberías; luego realizar simultáneamente todas estas instalaciones, para reducir las afectaciones o suspensiones del servicio. Otra estrategia es efectuar los trabajos en horarios nocturnos en zonas donde el tráfico en el día sea muy intenso; obviamente, esto implica disponer de alumbrado eléctrico en las obras, que debe ser considerado en los costos de construcción.

La seguridad en la obra también debe ser cuidada, tanto para los ciudadanos como para el personal del organismo operador de agua y la empresa constructora. Por esta razón, es requisito que se señalen y acordonen las áreas de trabajo y se proteja al personal de construcción con equipo de seguridad adecuado, como se muestra en los ejemplos de la *Figura 4-9*.



Figura 4.9.a. Acordonamiento de zona de trabajo.



Figura 4.9.b. Seguridad del personal en trabajos de sectorización de la red.

Figura 4-9. Ejemplos de seguridad en la ejecución de trabajos de sectorización de redes de agua potable.

En la actualidad, no solo los servicios de agua potable y drenaje son subterráneos, por ello se previenen afectaciones mediante la consulta de planos propios y de otras empresas prestadoras de servicios como alcantarillado, electricidad, gas, telecomunicaciones y otros. En obras de sectorización de redes de agua potable siempre será más conveniente realizar excavaciones a mano y optar por el uso de maquinaria pesada solo cuando se tenga la certeza de la ausencia de otros servicios subterráneos.

Ejemplo)

En la Figura 4-10 se muestran imágenes con ejemplos de afectaciones ocurridas durante trabajos de sectorización de redes.



Figura 4.10.a. Tubería de drenaje atravesando una estación de medición.



Figura 4.10.b. Ducto de fibra óptica justo a un costado de una caja de válvulas.

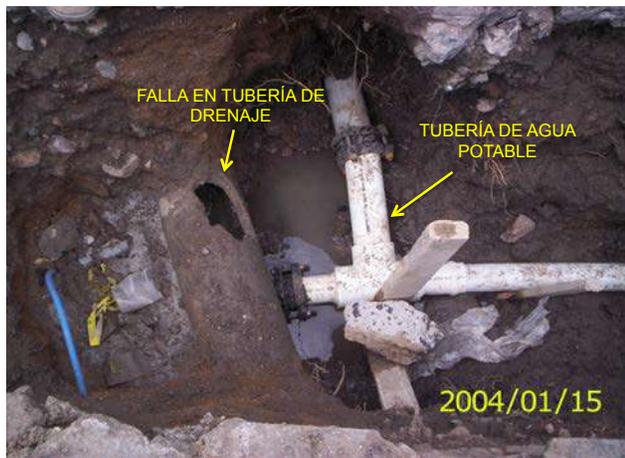


Figura 4.10.c. Afectación a una tubería de drenaje.



Figura 4.10.d. Reposición de una conexión domiciliaria afectada.



Figura 4.10.e. Restauración pavimentos y adoquines en zonas históricas de la ciudad.

Figura 4-10. Ejemplos de afectaciones ocurridas durante trabajos de sectorización de redes de agua potable.

Como parte de las actividades de la construcción de las obras de sectorización de la red, se requiere documentar en planos digitales todos los detalles de obra terminada. En una copia de los planos del diseño ejecutivo, se actualiza el trazo de la red que se encuentra en campo y que no corresponde con lo originalmente esperado. En una segunda copia de estos planos de diseño, se dibuja la infraestructura de fontanería que queda instalada finalmente.

Toda esta información es importante para retroalimentar el modelo de simulación hidráulica durante el proceso de construcción y, posteriormente, para verificar la operación hidráulica de los sectores.

4.3.2 Construcción de cajas e instalación de válvulas

Las cajas a construir durante la sectorización de la red albergarán, en general, dos tipos de válvulas: de seccionamiento (compuerta y mariposa) y de control automático (de caudal y presión). Las dimensiones y especificaciones constructivas para las cajas de válvulas de seccionamiento normalmente están en función del diámetro y del número de válvulas a instalar en cada cruce.

El montaje de válvulas de control automático requiere de piezas especiales adicionales, por lo que las dimensiones de los trenes de montaje suelen ser mayores. Entonces, hay que revisar las especificaciones técnicas de las válvulas del proyecto y diseñar sus cajas de válvulas, adaptando las dimensiones y especificaciones que se disponen para las cajas de válvulas de seccionamiento.

En general, el procedimiento constructivo para las cajas y de instalación de válvulas de seccionamiento y de control automático, incluye la siguiente secuencia de actividades:

- Trazo y corte de pavimento.
- Ruptura de pavimento.
- Excavación a mano.
- Corte de tubería.
- Montaje de válvulas.
- Colado de plantilla.
- Armado y colado de losa de cimentación.
- Colocación de muros de tabique recocado rojo.
- Cimbrado de losa.
- Armado y colado de dalas de cerramiento y losa de cubierta.
- Colocación de marco para la tapa.
- Colado de losa y reposición de pavimento.
- Limpieza y remoción de escombros.

En varias situaciones, se puede requerir la demolición de cajas existentes para reconstruir una nueva que se adapte a las válvulas de diseño.

Ejemplo)

En la Figura 4-11 se muestran ejemplos de imágenes del proceso constructivo de cajas e instalación de válvulas, que se realizaron en la implementación de un proyecto de sectorización de red.



Figura 4.11.a. Corte de pavimento.



Figura 4.11.b. Ruptura de pavimento.



Figura 4.11.c. Excavación a mano.



Figura 4.11.d. Corte de tuberías.



Figura 4.11.e. Montaje de válvula.



Figura 4.11.f. Colocación de muros de tabique y armado y colado de dalas.



Figura 4.11.g. Cimbrado y armado de losa y colocación de marco para tapa.



Figura 4.11.i. Colado de losa, reposición de pavimento y limpieza.

Figura 4-11. Procedimiento de construcción de cajas e instalación de válvulas.

Durante la construcción de cajas e instalación de válvulas, hay que tomar las prevenciones necesarias para disponer de la siguiente herramienta y maquinaria: a) generador eléctrico, b) cortadora de disco de diamante, c) rompedora eléctrica, d) retroexcavadora con martillo hidráulico, e) esmeriladora para corte de tubería, f) bomba de achique, g) compactadora bailarina, y h) soplete. En la ruptura del pavimento también se utiliza el rompedor eléctrico o maquinaria pesada.

4.3.3 Ejecución de cortes de tuberías

En un proyecto de sectorización normalmente se diseña una cantidad considerable de cortes en tuberías para lograr el aislamiento hidráulico entre sectores. Ello requiere la suspensión del servicio

mediante el cierre de válvulas y/o suspensión del servicio desde los pozos de suministro y/o tanques de regularización.

En la ejecución de cortes de tuberías, primero se realiza la obra civil de excavación y construcción de cajas en todos los sitios donde se realizarán los cortes, posteriormente, se ejecutan simultáneamente el máximo de cortes posibles. De esta manera, no solo se reducirá el número de suspensiones de servicio, sino que también disminuirán los volúmenes de agua perdidos por vaciado de tuberías.

Según el diseño, el aislamiento de sectores debe ser permanente, por lo tanto, se colocan tapones en los puntos de separación de tuberías; si se colocan válvulas en lugar del tapón, se corre el riesgo futuro de que la válvula se abra y se pierda el aislamiento del sector. Solo se instalan válvulas de seccionamiento cuando se trata de distritos hidrométricos para pruebas temporales de cierre dentro de los sectores, o bien, para dejar puntos de seguridad en el suministro de agua entre sectores, que solo funcionarán cuando se presenten situaciones de emergencia en el sistema de abastecimiento de agua potable.

Ejemplo)

En la Figura 4-12 se muestran ejemplos de los cortes de tuberías permanentes, que se diseñaron para aislar o redistribuir caudales en los sectores hidrométricos de proyecto.



Figura 4.12.a. Corte de tuberías con tapas ciegas en los extremos.



Figura 4.12.b. Corte de tubería con carrete ciego unidos con juntas Gibault.

Figura 4-12. Ejemplos de cortes de tuberías para aislar sectores o redistribuir caudales en su red interior.

4.3.4 Instalación o sustitución de tuberías

Las tuberías instaladas en los trabajos de sectorización de la red de agua potable tienen en general dos propósitos:

- Conectar dos tuberías existentes para mejorar la distribución del agua.
- Sustituir tramos de tuberías existentes para aumentar la capacidad hidráulica y mejorar las presiones de servicio.

En el primer caso, se trata de tramos pequeños de apenas unos cuantos metros, en el segundo caso las longitudes pueden variar de un par de decenas de metros, hasta tramos de un par de kilómetros.

En general, el procedimiento constructivo para la instalación y/o sustitución de tuberías incluye la siguiente secuencia de actividades:

- Trazo, corte y demolición pavimento.
- Excavación de zanja (a mano o con maquinaria pesada).
- Tendido y conexión de tubería.
- Relleno con material de banco.
- Compactado con bailarina.
- Reposición de pavimento.
- Limpieza y remoción de escombros.

En la Figura 4-13 se muestran imágenes de un ejemplo de la instalación de tubería en los trabajos de sectorización de la red.



Figura 4.13.a. Trazo, corte y demolición de pavimento.



Figura 4.13.b. Excavación de zanja a mano.



Figura 4.13.c. Excavación de zanja con maquinaria pesada.



Figura 4.13.d. Tendido de tubería.



Figura 4.13.e. Conexión de tubería.



Figura 4.13.f. Relleno de zanja y compactado con bailarina.



Figura 4.13.g. Reposición de pavimento de concreto y limpieza.



Figura 4.13.h. Reposición de pavimento de asfalto y limpieza.

Figura 4-13. Imágenes del ejemplo de instalación de tuberías en trabajos de sectorización de la red de agua potable.

De acuerdo con la normatividad y en función de la longitud, es necesario realizar pruebas de presión hidrostática en la tubería que se instala (*NOM-001-CONAGUA, Ref. 4.1*). En México está especificado que se deben realizar pruebas en conducciones para la misma clase de tubería, para tramos de 500 metros, con un máximo de 1,000 metros. En tuberías de redes de distribución estas pruebas se deben ejecutar entre cruceiros en tramos de +/- 100 metros, con un máximo de 500 m.

Finalmente, es conveniente resaltar que en la instalación o sustitución de tuberías implica trabajar bajo los siguientes escenarios:

- En banquetas o vialidades con tránsito vehicular.
- Con tuberías viejas “vivas” que permanecen conectadas a la red, sin una función hidráulica o de servicio.
- Ante la presencia de un número elevado de conexiones domiciliarias conectadas a las tuberías por sustituir.
- Con afectaciones potenciales a otras infraestructuras subterráneas (telefonía, eléctrica, comunicaciones digitales, drenaje y alcantarillado).

Estos posibles escenarios ponen de manifiesto una vez más que, aunque en la construcción de sectores en la red de agua potable se trata normalmente de obras menores, éstas no dejan de ser actividades complejas en aspectos técnicos, afectaciones a ciudadanos y usuarios del sistema de abastecimiento de agua potable.

4.3.5 Ejecución de reconexiones de tuberías

Como se describió en la unidad tres del libro, las reconexiones se proponen en el diseño, principalmente para dar paso al agua hacia otra zona de la red.

Es común, entonces, que se tengan que conectar dos tuberías que tengan igual o distinto diámetro y material, lo que implica realizar labores de pailería, junteo, desconexión de tapas ciegas, entre otras.

Ejemplo)

En la Figura 4-14 se muestra un croquis de una parte de la red existente y la modificación que debe hacerse en el proyecto de sectorización. Se trata sobre reconectar un tramo de una tubería de seis pulgadas de diámetro, con otra de tres pulgadas y desconectar la línea perpendicular de seis pulgadas de diámetro; todas las tuberías existentes son de hierro fundido y la reconexión se realiza con un material de PVC en diámetro de 3 pulgadas.

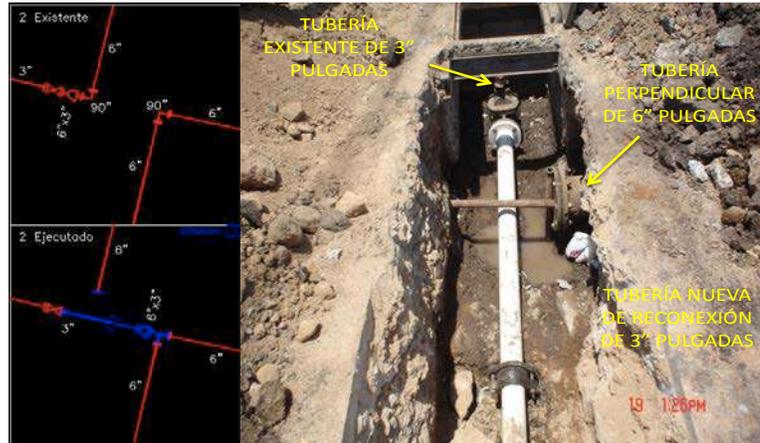


Figura 4-14. Ejemplo de reconexión de tubería de tres pulgadas para unir dos tramos que actualmente están desconectados.

Como se observa, por lo general las obras de reconexión son ejecutadas como complemento a las obras de cortes, instalación y sustitución de tuberías. En ese sentido, no puede hablarse de un proceso constructivo específico; por el contrario, se pueden presentar una amplia variedad de posibilidades, que suceden en función de la infraestructura existente y de la habilidad de los equipos de fontanería, pailería y construcción que se dispongan.

Ejemplo)

Una reconexión de este tipo se presenta en la Figura 4-15, las imágenes muestran escenas sobre la reconexión de una conducción de material PVC de ocho pulgadas, hacia una tubería de asbesto-cemento de cuatro pulgadas, utilizando piezas especiales (codos, bridas, reducciones, juntas Gibault) y realizando trabajos de pailería en el sitio.



Figura 4-15. Ejemplo de reconexión de tubería de ocho a cuatro pulgadas para derivar caudal hacia otra zona.

La experiencia de los organismos operadores de sistemas de agua potable que han emprendido la sectorización de sus redes, advierte que estas obras son dinámicas. Es justamente durante la ejecución de las obras que se encuentran diferentes alternativas de solución para lograr los objetivos hidráulicos originalmente diseñados. Solo hay que evitar que el diseño integral de la sectorización de la red no cambie, sino solo las se tengan variantes en cuanto a la ejecución constructiva.

Por último, se insiste en que para reducir las afectaciones a los ciudadanos es clave la coordinación y facilidad de interacción entre los diferentes equipos de trabajo del organismo operador del sistema de agua potable, especialmente para cerrar válvulas y/o suspender el servicio para realizar los trabajos “en seco”. Ello, además de cuidar la imagen institucional, incrementa la efectividad de los trabajos y reduce los costos de la obra.

4.4 INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPAMIENTO

La instrumentación de sectores y distritos hidrométricos es indispensable para controlar los caudales y presiones en la red, y realizar las pruebas de eficiencia hidráulica y volumétrica del sistema de abastecimiento. Consiste en colocar equipos para medición de caudal y presión, e instalar válvulas de control automático.

El caudal se mide con equipos denominados caudalímetros o macromedidores. Se aprovechan todos los medidores instalados, pero se verifican las exactitudes de registro con pruebas de campo colocando un medidor auditor en serie, tal como se describe en el *inciso 2.5.1*. Los equipos que resulten descompuestos, con fallas o fuera de los rangos de exactitud deben ser reemplazados por medidores nuevos. Tanto en los equipos usados como los nuevos, se lleva una bitácora de cada equipo, para determinar la evolución de su exactitud, deterioro y fechas de mantenimiento.

La medición de presión en los sectores se realiza en las conexiones domiciliarias de la red con manómetros comerciales, de lectura visual o de “*data logger*” Para efectos de evaluación de eficiencia hidráulica, es suficiente registrar mediciones continuas de presión solo en el punto de entrada de agua los sectores y en forma puntual en varios puntos distribuidos en la red. La instalación de los manómetros es directa sobre el cuerpo de la tubería y se recomienda construir un dispositivo para las mediciones en conexiones domiciliarias.

Las válvulas de control automático que más se utilizan en la implementación de los sectores de la red de agua potable, son las limitadoras de caudal, sostenedoras y reductoras de presión. Es importante cumplir con las especificaciones de los fabricantes para obtener resultados satisfactorios en su funcionamiento. Asimismo, deben instalarse con mucho cuidado para no dañar sus accesorios. Todas las válvulas de control automático que se instalen deben calibrarse *in situ*. Para la limitadora de caudal, se requiere la medición del caudal con un equipo auditor colocado en serie y para las reductoras y sostenedoras de presión solamente un par de manómetros.

En este capítulo se describen los procesos de instalación y operación de los instrumentos de medición y control, en la implementación del proyecto de sectorización en la red.

4.4.1 Instalación y operación de medidores de caudal y presión

La medición del caudal y la presión es básica para la implementación de los sectores de la red de distribución. Si se conoce el valor del caudal que se suministra a un sector, entonces se puede evaluar la

evolución de su eficiencia volumétrica e hidráulica. Igualmente, con el valor de la presión, se puede analizar el funcionamiento hidráulico de la red del sector.

Como se ha visto a lo largo del libro, los sectores se aíslan físicamente unos de otros y el abastecimiento de agua a cada uno de ellos proviene directamente de una obra de captación, regulación, re-bombeo o línea de conducción primaria. Por lo tanto, es necesario contabilizar el agua que ingresa a cada sector para fines diversos, por ejemplo: para verificar la producción de agua, realizar auditorías de fugas, identificar fallas de operación, etc. Por su parte, el registro de las presiones en la red de distribución de los sectores sirve para ajustar el modelo de simulación hidráulica, o para identificar zonas críticas en la operación, comprobar el funcionamiento de válvulas, entre otros.

Entonces, durante la fase constructiva de los sectores de la red, se realiza la instalación de dispositivos de medición de caudal y presión, se comprueba su buen funcionamiento y se hacen los preparativos para tenerlos disponibles en el momento de las pruebas de puesta en operación y evaluación de eficiencias.

4.4.1.1 Medidores de caudal

En cualquier situación, la medición del caudal suministrado a los sectores o distritos hidrométricos es indispensable para realizar los análisis de fugas en la red y determinar las demandas de agua.

Primordialmente, se recomienda colocar medidores fijos, que registren el caudal de manera continua en el tiempo. Esto implica elaborar el diseño y construcción de la estación de medición para proteger los equipos del vandalismo y de los agentes físicos externos.

Ejemplo)

En la Figura 4-16 se muestra una estación de medición de caudal para registrar continuamente el caudal y volumen de agua que ingresa a un sector hidrométrico de la red; se observa que se trata de un medidor fijo ultrasónico con lectura en data logger.



Figura 4-16. Ejemplo de estación de aforo con un medidor fijo en un sector hidrométrico para registro de caudal continuo.

En muchos sistemas de abastecimiento de agua potable, la colocación de equipos de medición fijos llega a ser tan numerosa y costosa, que es preferible realizar las pruebas en los sectores hidrométricos con equipos portátiles de medición. De cualquier modo, deben diseñarse y construirse estaciones de aforo, para su colocación temporal.

Ejemplo)

En la Figura 4-17 se muestra una estación para medición temporal con equipos portátiles de medición de caudal en sectores de la red; se observa que se trata de un medidor tipo electromagnético de inserción portátil, sin embargo, también se utilizan medidores de tipo ultrasónico de tiempo en tránsito.



Figura 4-17. Ejemplo del interior de una estación de aforo para medición de caudal con equipos portátiles.

En la práctica, se han desarrollado dos técnicas de medición: a) *Área – velocidad* y b) *Carga piezométrica*.

a) *Método de área – velocidad para medir el caudal, Q*

En este método se utiliza el principio de continuidad de hidráulica, a través de la ecuación para flujo incompresible:

$$Q = A \times V \quad (4.1)$$

Donde A el área perpendicular del conducto y V la velocidad media del flujo. El área perpendicular A es sencilla de calcular en un conducto circular a presión, midiendo su diámetro, d , y aplicando la

ecuación del área de un círculo. Por su parte, la velocidad media V , del escurrimiento de agua en conductos a presión se mide con propelas, hélices, turbinas, tubos Pitot, sensores ultrasónicos y electromagnéticos.

b) Método de carga piezométrica para medir el caudal Q

El otro método indirecto para medir el caudal que tiene una corriente de agua, es el que expresa este caudal como una función de la carga piezométrica. La relación es muy sencilla, en matemáticas se denomina ecuación de tipo potencial”:

$$Q = Ch_p^z \quad (4.2)$$

Donde h_p = Carga piezométrica C y Z son coeficientes que dependen fundamentalmente de características geométricas del dispositivo de medición que se trate y se obtienen previamente a la medición. Puede ser en campo, con equipos certificados, cuando se se trata de estructuras muy grandes, o bien, en laboratorio, si se habla de dispositivos pequeños.

Entre los dispositivos que utilizan esta relación, se pueden mencionar la placa orificio, el tubo Venturi, la tobera, el tubo dall. Todos estos aparatos miden la carga piezométrica en algún punto, lo cual se hace mediante mangueras, tubitos, manómetros, celdas de presión (transductores) y sensores ultrasónicos.

En términos generales, la selección de medidores depende en gran medida de una serie de factores, principalmente del sitio donde se instalará, la capacidad del medidor, los registros deseados, los costos y la disponibilidad en el mercado, entre otros. Los factores más relevantes que se toman en cuenta son los siguientes:

Factores Hidráulicos.- El medidor debe garantizar una exactitud del 100% con un error máximo de $\pm 0.5\%$. El medidor debe cubrir el 100% del registro de los caudales que se suministran al sistema. La pérdida de carga piezométrica hidráulica debe ser minimizada.

Factores funcionales de instalación, operación y mantenimiento.- El medidor debe registrar caudal instantáneo y volumen, además de disponer de un sistema de adquisición de datos continuos. Es deseable que disponga de un registrador de presión. El costo, instalación y mantenimiento debe ser minimizados.

Factores físicos, sociales y ambientales.- El medidor debe protegerse de los agentes climáticos y del vandalismo. No debe deteriorar la calidad del agua. Debe ser comercial y con respaldo técnico en el mercado.

Existen especificaciones de instalación para cada tipo de medidor, que deben ser respetadas para obtener un funcionamiento adecuado. Una de ellas es que los medidores deben instalarse en tramos rectos de tuberías, donde el flujo no sea interferido por algún obstáculo, como por ejemplo: codos, reducciones, válvulas, etc. En la *Figura 4-18* se muestran varios detalles que se deben considerar durante la instalación de un macromedidor de caudal.

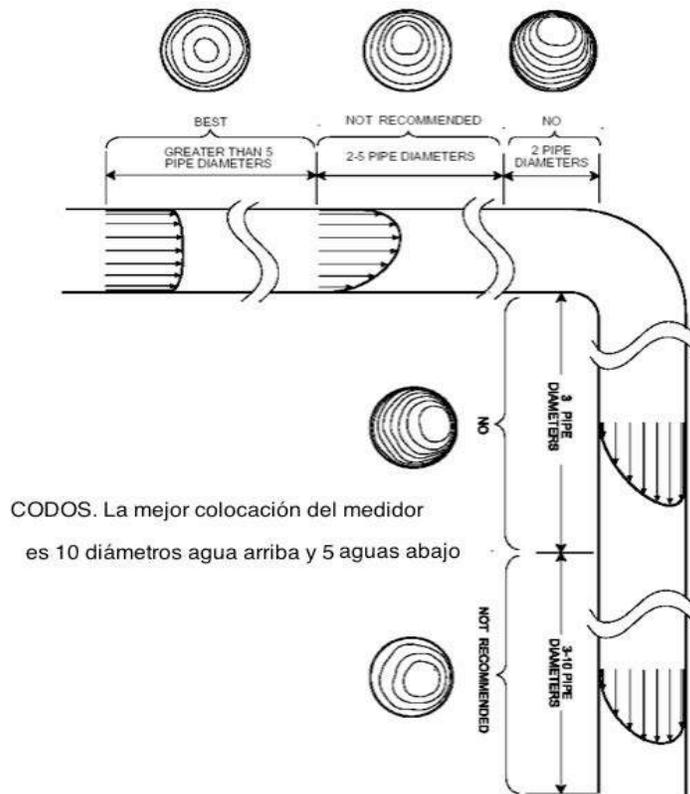


Figura 4.18.a. Modificación del perfil de velocidades por un codo de 90° y posición recomendada del medidor.

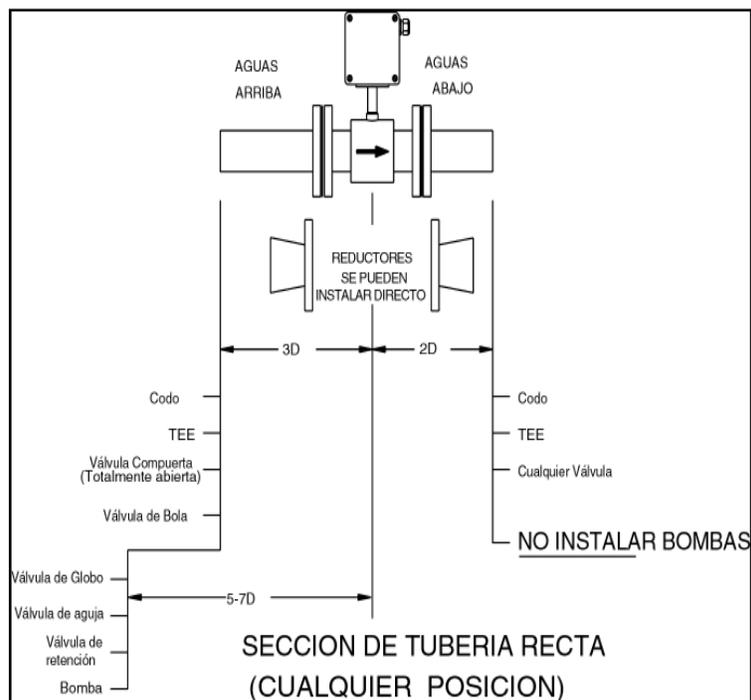


Figura 4.18.b. Distancias mínimas para instalar un medidor electromagnético.

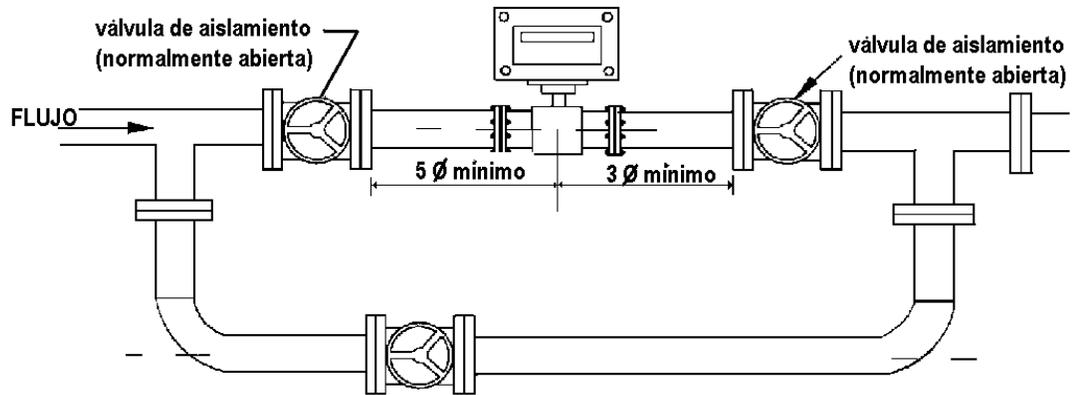


Figura 4.18.c. Montaje de un medidor electromagnético con un by-pass para su mantenimiento.

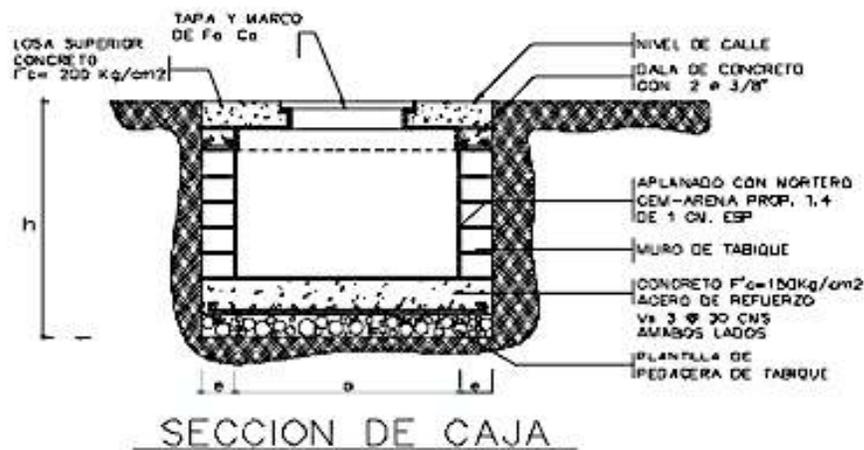


Figura 4.18.d. Caja típica para instalación y protección del medidor.

Figura 4-18. Especificaciones de instalación de medidores del volumen de agua suministrada. Fuentes: Badger Meter de las Américas y "Manual técnico de bolsillo de medidores de pozos" IMTA.

Para dimensionar el medidor se requiere tener una idea a priori de la magnitud del caudal, la velocidad y la presión a la entrada del sector hidrométrico, así como el diámetro de la tubería donde se instalará. Con estos datos elige el medidor consultando los catálogos de los fabricantes, hasta que se cumplan los requisitos anteriormente mencionados.

Ejemplo)

Dimensionar un medidor de tipo electromagnético, para registrar un rango de caudales de 10 a 30 L/s, con una presión de 1.5 kg/cm^2 , en una tubería de seis pulgadas de diámetro.

Solución)

Los caudales que se registrarán, con unidades de catálogos de fabricantes, están en un rango de $10 \text{ L/s} = 600 \text{ L/min}$; $30 \text{ L/s} = 1800 \text{ L/min}$.

Al consultar las especificaciones proporcionadas por algún fabricante (ver la Figura 4-19), se busca el medidor recomendable, que en este ejemplo resulta de 2.5 pulgadas de diámetro.

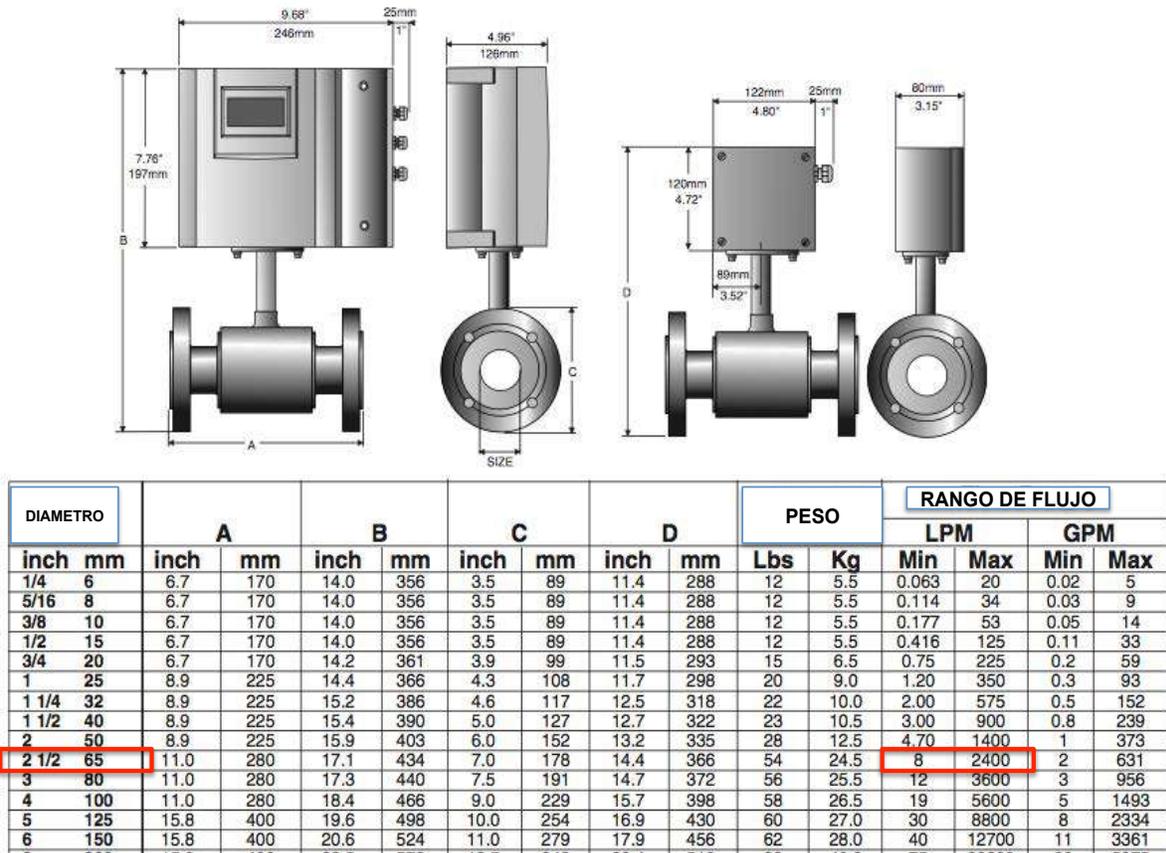


Figura 4-19. Ejemplo de selección del medidor electromagnético de un catálogo de fabricante de equipos de medición, con base en el caudal.

La exactitud especificada por el fabricante es de +/- 0.25% para velocidades en un rango de 1 a 33 pies/s (0.3 a 10 m/s). Entonces para el rango de caudales que se espera registrar en el sector, la velocidad del agua correspondientes será iguales a:

$$V_{\text{mínima}} = \frac{Q_{\text{min}}(m^3/s)}{A_{\text{tubería}}(m^2)} = \frac{0.01}{\frac{\pi}{4}(0.065)^2} = 3.0 m/s$$

$$V_{\text{máxima}} = \frac{Q_{\text{max}}(m^3/s)}{A_{\text{tubería}}(m^2)} = \frac{0.03}{\frac{\pi}{4}(0.065)^2} = 9.0 m/s$$

Así, las velocidades cumplen con los rangos especificados, para tener la exactitud garantizada. Sin embargo, desde el punto de vista hidráulico, estas velocidades sobrepasan las especificadas en los criterios de diseño de 3.5 m/s máximo, por lo tanto, se modifica el diámetro a:

$$d = \sqrt{\frac{Q_{\max}}{\frac{\pi}{4} V_{\max}}} = \sqrt{\frac{0.03}{\frac{\pi}{4} \times 3}} = 104\text{mm} \Rightarrow \text{diámetro comercial} \approx 4 \text{ pulgadas}$$

Revisando nuevamente el catálogo del fabricante, resulta que con este diámetro de medidor el rango de caudales mínimo y máximo, en los que es exacto el equipo, son 19 a 5,600 litros por minuto, que cubren el rango de caudales que se espera registrar.

Finalmente, la presión de trabajo de 1.5 kg/cm^2 es menor que la garantizada por el fabricante, el cual señala que el medidor soporta hasta 10 bares.

En cuanto aspectos prácticos de la instalación de medidores en campo, lo primero que se hace es un reconocimiento de cada uno de los sitios donde se suministra agua a los sectores y se revisan físicamente los medidores instalados, anotando los siguientes datos:

- Marca, modelo y tipo.
- Diámetro.
- Tipo de Lectura de datos.
- Fecha de instalación.
- Capacidad.
- Distancia aguas arriba y aguas abajo, sin obstáculos.
- Posición del medidor.

Generalmente, la marca, modelo y capacidad están indicados en el cuerpo del medidor o en la carátula, como se observa en la *Figura 4-20*. La lectura de datos puede ser digital, carátula mecánica, gráfica, etcétera.



Figura 4-20. Medidor observado en campo que tiene en su cuerpo el modelo, marca y la capacidad.

La fecha de instalación se obtiene en los archivos del organismo operador del sistema de abastecimiento de agua. En cuanto al tipo de medidor, se utiliza como referencia la clasificación de medidores para conducciones a presión, mostrada en la *Figura 4-21*.

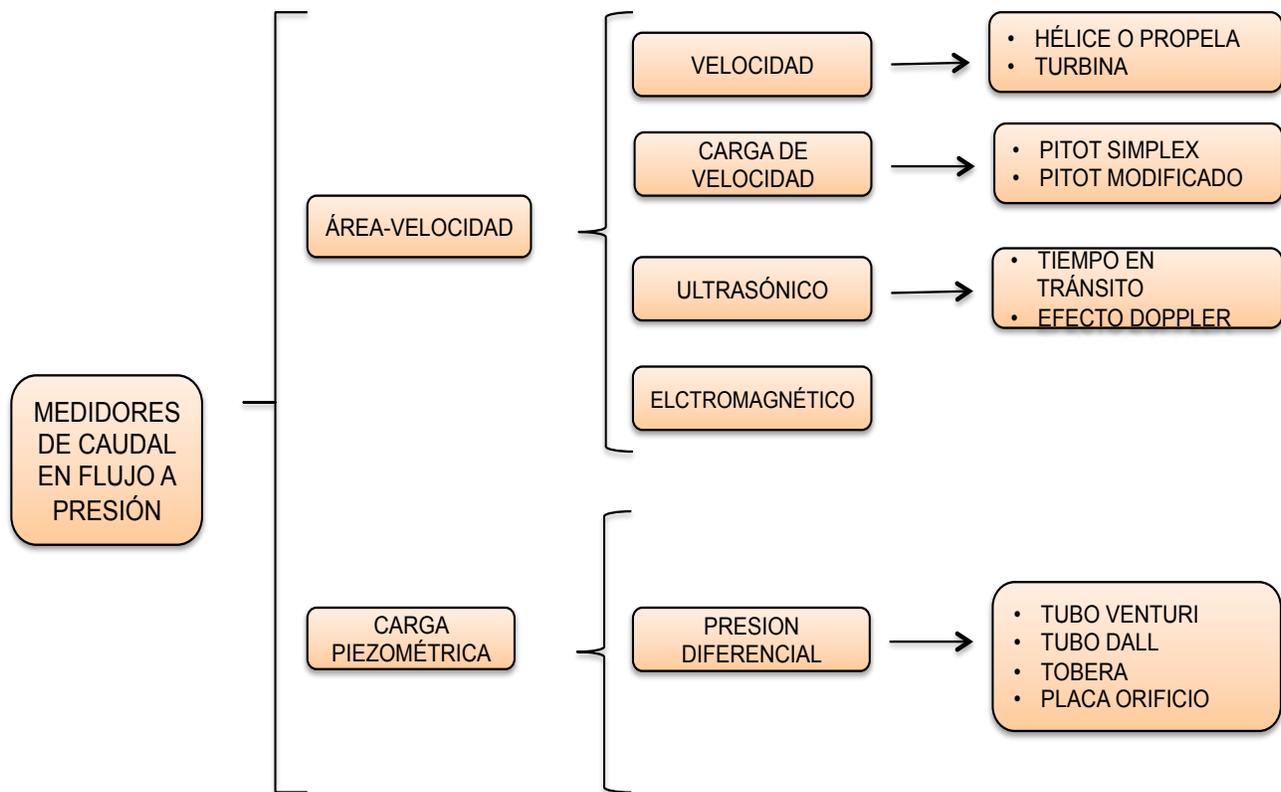


Figura 4-21. Clasificación de medidores de agua en conducciones a presión.

Es muy importante que se tome una fotografía de los medidores, para que se tenga una imagen del estado en que se encuentra cada uno. También, es recomendable elaborar una ficha con los resultados de la inspección de cada medidor, similar a la que se presenta en la *Figura 4-22*. Estas fichas de cada medidor son útiles para identificar fácilmente las condiciones de instrumentación de cada sector y para referenciar las pruebas posteriores que se realizarán sobre él.

Luego de realizar la inspección física de los medidores, se realizan las pruebas de verificación del error de exactitud de cada aparato (*ver inciso 2.5.1*). Estas pruebas están especificadas en normas, por ejemplo en México la ejecución de las pruebas de exactitud de medidores de agua potable fría se apoya en los métodos señalados en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCFI-1994, la cual está basada en la Norma Internacional ISO-4064. Además de los requerimientos de fabricación y procedimientos de prueba, en esta norma se especifica el error permisible de exactitud, en función del porcentaje del gasto nominal de operación, el cual es de $\pm 2\%$ de error para un rango de operación entre el 5 y 100% del gasto nominal del medidor. En la *Figura 4-23* se presenta la curva típica de errores de un medidor en función del gasto nominal, donde se indican los parámetros de operación y los errores permisibles de exactitud, dependiendo del rango de operación en el que se encuentra funcionando el aparato.

Cuando existan situaciones con algunos tipos o modelos de medidores que se encuentren fuera del alcance de la norma Mexicana, se recomienda apegarse a los estándares internacionales, como el de la American Water Works Association, AWWA, los de la International Water Association, IWA, o los de la International Standards Organization, ISO.



Figura 4-22. Ficha técnica de inspección de medidor en un pozo de suministro de agua potable a la red de distribución.

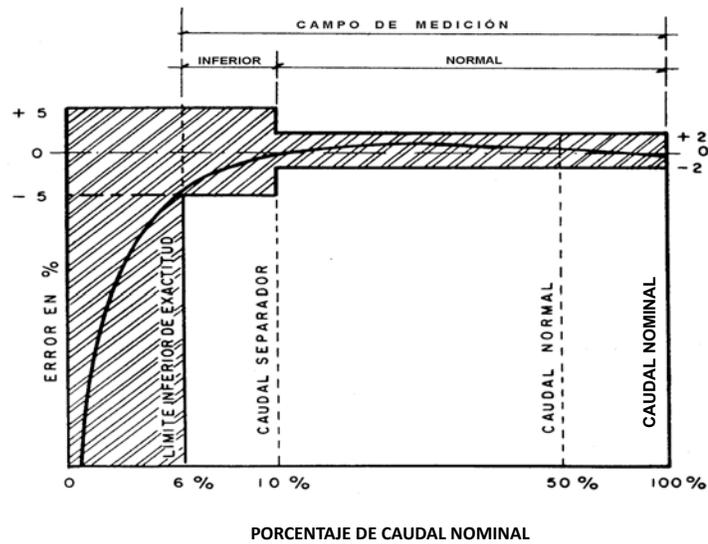


Figura 4-23. Curva característica de errores de exactitud de medidores de caudal.

La prueba de exactitud de los medidores también se puede realizar aplicando alguna de los procedimientos siguientes:

- Desmontar el medidor y probarlo en un banco de laboratorio.
- Comparar con registros de un segundo medidor calibrado e instalado en serie.
- Sustituir el equipo existente por otro calibrado y comparar ambos registros.

No obstante, el método más rápido, práctico y económico es el de comparación de registros con un medidor portátil calibrado, como indica en el *inciso 2.5.1*.

A partir de los resultados de las pruebas e inspecciones de campo, se seleccionan aquellos medidores que deben ser reemplazados por encontrarse deteriorados, descompuestos o porque funcionan fuera de los niveles de exactitud permisibles. Por supuesto, se seleccionan también en aquellos sectores que no dispongan de medidor. Es necesario que se dejen completamente bien instrumentados los sectores con medidores de caudal con el fin de establecer las condiciones suficientes que permitan tener el control de los caudales suministrados y evaluar adecuadamente las eficiencias hidráulicas y volumétricas de cada sector implementado.

La adquisición de medidores es un asunto que depende de las existencias en el mercado y de la disponibilidad de los recursos del organismo operador del sistema de agua potable. Los diversos tipos y tamaños de medidores actualmente disponibles en el mercado se distinguen por sus especificaciones de dimensión, de operación hidráulica, de exactitud en la medición y de resistencia al desgaste. En el *Cuadro 4-1* se muestran algunas características comerciales comparativas entre varios tipos de medidores de mercado.

Cuadro 4-1. Características comerciales y de mercado de medidores de caudal.

Tipo de medidor	Características comerciales y de mercado
<i>Velocidad</i>	<i>Están constituidos con una turbina o hélice, que gira con el empuje del flujo de agua; el número de vueltas indica la velocidad del agua. Se requieren insertar en el conducto contra la corriente de agua. Los costos son en general bajos (alrededor de 500 USA dólar) y varían según el diámetro. Son propensos a descalibración y a bloqueos en su mecanismo.</i>
<i>Carga-velocidad</i>	<i>Están conformados por tubos de 1 a 2 pulgadas de diámetro que se insertan contra el flujo. A este grupo pertenecen básicamente los tubos Annubar y Pitot. La instalación es simple, se tiene que perforar la tubería con una broca, colocar una válvula de inserción que se puede abrir y cerrar en cualquier momento; se puede instalar aún con el conducto en operación. Sus costos oscilan alrededor de los 2,500.00 USA dólar.</i>
<i>Ultrasónicos</i>	<i>Se componen de sensores que envían y reciben señales de sonido de alta frecuencia, diagonalmente al flujo de agua, para medir su velocidad. Existen medidores cuyo principio es el tiempo de travesía y aquellos que se basan en el efecto Doppler. Generalmente son equipos de alto costo (aproximadamente 9,000 USA dólar), pero tienen muy buena exactitud y gran flexibilidad de instalación. Comúnmente, se utilizan en forma portátil, pero también pueden quedar fijos insertándolos en la tubería.</i>

<i>Electromagnéticos</i>	<i>Consta de dos bobinas colocadas una a cada lado del cuerpo del aparato, que son excitadas por una corriente alterna, con lo que se produce un campo magnético uniforme a través de la parte interna del tubo; conforme pasa el flujo de agua por dicho campo magnético, se genera una inducción de voltaje que es percibida por dos electrodos diametralmente opuestos. El cambio de voltaje se relaciona con la velocidad del escurrimiento. El medidor es de acero inoxidable o aluminio, recubierto de neopreno, plástico o cerámica. Prácticamente no provoca pérdida de carga piezométrica, tiene mucha exactitud, pero alto costo de adquisición (del orden de los 2,500.00 USA dólar en promedio).</i>
<i>Presión diferencial</i>	<i>También llamados Deprimógenos, estos aparatos se utilizan en tuberías, consisten de un elemento que estrangula al flujo y crea un cambio en la carga piezométrica, que casi siempre se traduce en una pérdida de energía. Dentro de este grupo de medidores se encuentran los Venturi, Tubo Dall, Tobera y Placa Orificio. Su costo es bajo (aproximadamente 1,000.00 USA dólar) y sus rangos de exactitud son buenos.</i>

Al comprar medidores de caudal, antes de aceptar la entrega al vendedor, se revisan los equipos minuciosamente, comprobando que estén completos, en buen estado físico, con las garantías y las cartas de especificaciones correspondientes.

La instalación del medidor en campo es una actividad que se realiza con mucho cuidado, puesto que cualquier accidente puede desajustar el equipo o romper alguna de sus piezas. La colocación del medidor se realiza una vez que se haya construido la caja de protección del mismo, atendiendo algunas de las recomendaciones siguientes:

- Drenar las instalaciones antes de instalar el medidor.
- Limpiar cuidadosamente el medidor antes de instalarlo.
- No instalar el equipo en puntos altos de las tuberías donde se acumulan bolsas de aire.
- No instalar medidores electromagnéticos cerca de líneas de alta tensión y revisar que tenga conexión a tierra.
- La tubería donde se instalará el medidor siempre debe trabajar a presión (tubo lleno).
- Cuidar que las juntas de las bridas, las tomas de presión y otros elementos, no se inserten de más hacia el interior de la tubería.
- Verificar que el sentido del flujo sea el indicado en el medidor.
- Revisar que las distancias a piezas y accesorios sean las recomendadas por el fabricante (Figura 4-24).
- Verificar que la carátula de lectura quede en posición de fácil visualización.
- Los tornillos para unir bridas se deberán apretar en forma alternada para evitar torceduras en estos elementos; especial cuidado se deberá tener con las bridas del medidor de placa de orificio.
- Proteger en lo posible el medidor contra intemperie y/o vandalismo (Figura 4-25).

Después de que quede lista la instalación del medidor, se anota la fecha y los datos que se observen en su carátula o registrador, para iniciar la bitácora del equipo. Asimismo, se realiza una prueba de verificación de su exactitud con un medidor auditor portátil, para asegurar que los valores de caudal serán confiables.

Ubicación de macromedidor

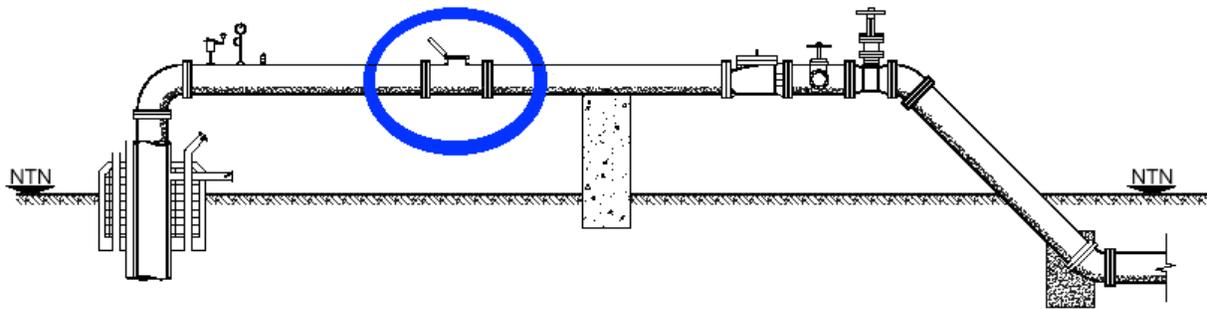


Figura 4-24. Ubicación del medidor en pozos, con distancias especificadas por fabricante.

Ubicación de medidor

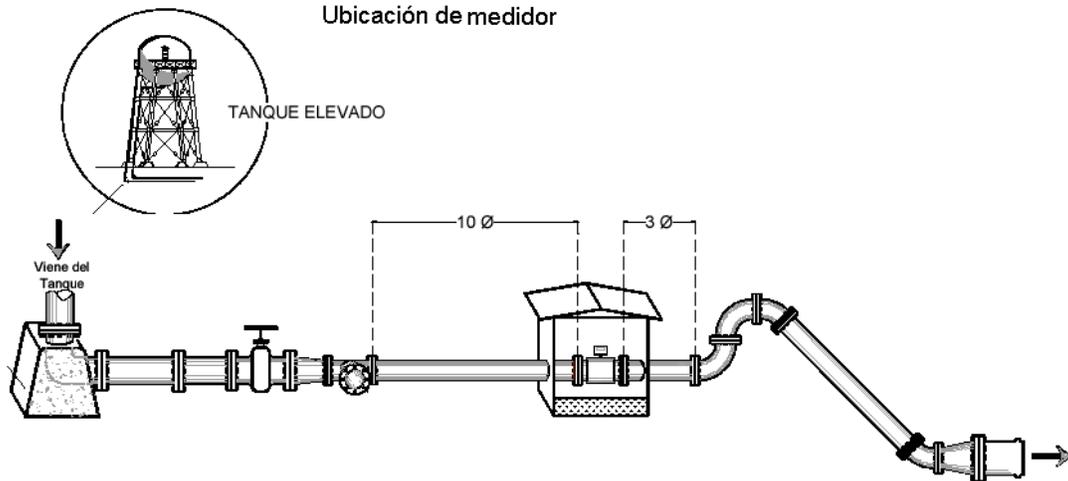


Figura 4-25. Ubicación de medidor de caudal a la descarga de un tanque, con protección y tubería con "cuello de ganso" para lograr tubo lleno.

4.4.1.2 Medidores de presión

Usualmente, la presión del agua en sistemas de tuberías para la condición atmosférica se supone igual a cero (presión manométrica), se mide en kilogramos por centímetro cuadrado, kg/cm^2 , o bien se registra en metros de columna de agua, mca, cuando se trata de carga piezométrica, al dividir la presión entre el peso específico del agua ($1 \text{ kg}/\text{cm}^2 = 10 \text{ mca}$).

Para medir la presión manométrica se utilizan manómetros, los cuales se pueden instalar permanentemente en las tuberías de la red, o fabricar un dispositivo portátil para mediciones en las conexiones domiciliarias, como el que se muestra en la *Figura 4-26*. Los manómetros comerciales fabricados con glicerina líquida dentro de su carátula reducen las vibraciones y fluctuaciones del flujo de agua durante la medición.

MANÓMETRO FIJO



MANÓMETRO PORTÁTIL



Figura 4-26. Manómetros fijo y portátil para medición de presión del agua en tuberías.

La selección de los manómetros simples, como los que se muestran en la *Figura 4-26*, se realiza en función de las presiones máximas y mínimas que se espera ocurran en la red de cada sector. Los manómetros comerciales se encuentran en el mercado en rangos muy variados, desde 0 a 4 kg/cm², hasta 0 a 14 kg/cm².

Existen medidores de presión que integran un sensor con un registrador y almacenador de datos continuos; normalmente se recomienda instalarlos en las tuberías de suministro de agua a los sectores y dentro del sector en las tuberías primarias de entrega de agua en bloque, ya que son costosos y requieren de mucho mantenimiento y protección de seguridad contra vandalismo. Muchos medidores de caudal tienen integrado el medidor de presión continua, por lo que conviene tener en mente esta ventaja en el momento de adquirir los equipos para los sectores.

Para los fines de registro de parámetros de presión en las redes de sectores, es suficiente con los manómetros fijos y portátiles para mediciones puntuales, y los que vienen integrados con el medidor de caudal, para registro continuo.

Los manómetros se calibran periódicamente con una “*Balanza de Pesos Muertos*”, con la finalidad de que los valores que se registren en la red de agua sean confiables (http://www.priisa.com.mx/pdf/balanza_pesos_muertos.pdf).

4.4.2 Instalación de válvulas de control automático

La instrumentación de sectores y distritos hidrométricos incluye la instalación de válvulas de control de flujo y presión. Las válvulas son elementos imprescindibles en los sistemas hidráulicos a presión, ya que permiten aislar tramos de la red, regular presiones, caudales y niveles, y protegerlos contra depresiones o sobrepresiones ocasionadas por flujo transitorio.

Existen diversos tipos de válvulas para controlar el flujo y la presión; entre ellas, se encuentran la válvula de compuerta, mariposa, bola, asiento plano y diafragma (*Figura 4-27*). Todas estas válvulas pueden ser equipadas con mecanismos automáticos de control, que permiten el funcionamiento de las mismas de acuerdo con sus especificaciones.



Figura 4-27. Tipos de válvulas de control en tuberías sistemas de agua potable.

Las válvulas de control automático son cada vez más utilizadas en los sistemas de agua potable, puesto que realizan funciones de control de presión y caudal sin la intervención de los operadores. Actualmente, hay diferentes fabricantes de este tipo de válvulas automáticas, que realizan distintos trabajos, como regular presión, sostener presión, limitar caudal y controlar niveles de agua. En la Figura 4-28 se muestran tres diferentes válvulas de control automático comerciales; se observa que todas tienen el mismo cuerpo, pero están equipadas con mecanismos automáticos de control para realizar distintos trabajos de operación hidráulica.

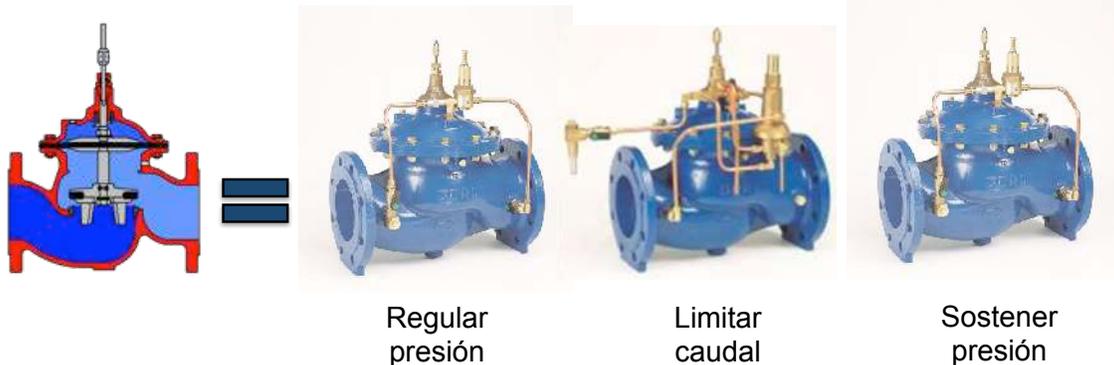


Figura 4-28. Tipos de válvulas comerciales de control automático.
Fuente: Catálogos de fábrica de válvulas DOROT, Indaga S. A. de C.V., 2008, México.

Las válvulas más utilizadas en el diseño de la sectorización de la red de agua potable son de tres tipos: a) Limitadora de caudal, b) Sostenedora de presión y c) Reductora de presión.

a) Válvula limitadora o reguladora de caudal

Esta válvula se instala principalmente en líneas de conducción que suministran agua en bloque al sistema de abastecimiento. La válvula se calibra para que fluya un caudal permanente por una tubería, predeterminado por el operador. El equipo nunca permitirá que fluya un caudal mayor al establecido, independientemente de las variaciones hidráulicas que ocurran aguas arriba de ella; si el caudal aguas arriba de la válvula es menor entonces la válvula se abre completamente. La válvula incluye una serie de accesorios y una placa orificio que son proporcionados por el fabricante, cuyas dimensiones dependen del diámetro y del caudal especificado a regular.

En la *Figura 4-29* se muestra una aplicación práctica de la válvula limitadora de caudal en un sistema hidráulico a presión. Se ve en la figura que las válvulas limitadoras de caudal instaladas en las conducciones obligan a que el agua producida por el pozo se distribuya de acuerdo con las consignas establecidas por el personal de operación de la red.

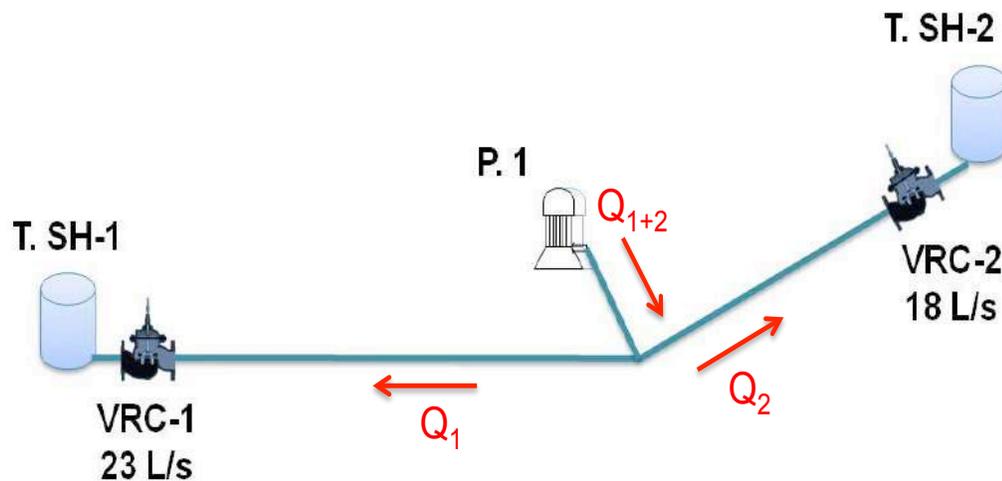


Figura 4-29. Aplicación práctica de la válvula limitadora de caudal en un sistema hidráulico a presión.

Fuente: Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable, CONAGUA.

Ejemplo)

En la fotografía de la Figura 4-30 se presenta un ejemplo una válvula limitadora de caudal de 10 pulgadas de diámetro, instalada para controlar el caudal que circula por la tubería de suministro a dos sectores hidrométricos de la red de agua potable.

Después de instaladas las válvulas en los sitios que se seleccionaron en el diseño de los sectores, se calibran en campo según el caudal especificado en el proyecto. Para ello, se coloca en serie un medidor de caudal portátil certificado, antes o después de la válvula. El caudal que se registre durante la prueba se ajusta con el accesorio piloto que tiene integrado la válvula.



Figura 4-30. Válvula limitadora de caudal instalada en tubería de 10 pulgadas de diámetro.

b) Válvula sostenedora de presión

Esta válvula mantiene una presión constante agua arriba de ella, independientemente de los cambios que ocurran en el flujo aguas abajo. Las válvulas sostenedoras de presión son útiles cuando se tiene un bombeo a un tanque y en el trayecto se tiene una derivación directa a la red; si no se sostiene la presión, el agua quizá no llegué al tanque (Figura 4-31).

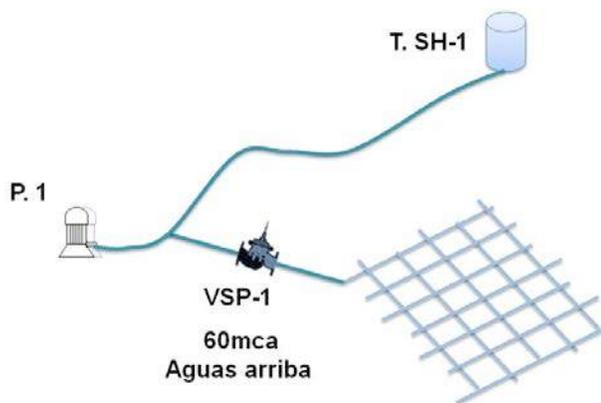


Figura 4-31. Aplicación típica de las válvulas sostenedoras de presión en una red de agua potable.

Fuente: Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable, CONAGUA.

La calibración de la válvula sostenedora de presión es más simple, solo se coloca un manómetro aguas arriba y otro aguas abajo, se manipula el piloto de la válvula hasta ajustar la presión de consigna especificada en el proyecto de sectores.

Ejemplo)

En la Figura 4-32 se presenta una válvula de 6" pulgadas de diámetro, instalada en una derivación a la red, para sostener la presión en la conducción que va hacia un tanque de regulación.



Figura 4-32. Válvula sostenedora de presión de seis pulgadas de diámetro, instalada en una derivación a la red de agua.

c) Válvula reductora de presión

Esta válvula mantiene una presión constante aguas abajo de ella, independientemente de las variaciones del flujo que se presentan aguas arriba. Se utiliza con mucha frecuencia en redes con topografía accidentada, para disminuir la presión en las zonas bajas. Este tipo de válvula reductora de presión se instala tanto en líneas de conducción como en tuberías de la red de distribución del sistema de agua potable.

Ejemplo)

En la Figura 4-33 se presenta una aplicación práctica del uso de válvulas reguladoras de presión. El tanque de abastecimiento de agua se localiza a una elevación muy alta, con respecto a los sectores hidrométricos. Las válvulas reducen la presión a su salida a un valor aceptable.

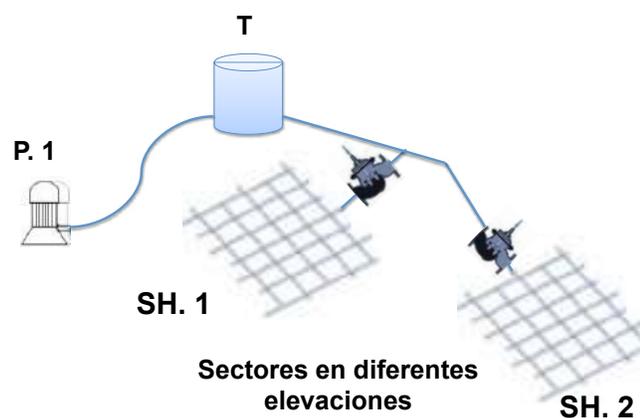


Figura 4-33. Aplicación típica de la válvula reguladora de presión en sectores de redes de agua potable.

Se aconseja consultar las recomendaciones del fabricante para el diseño de las válvulas. El diseño consiste en revisar las condiciones de operación de la válvula para que no ocurra el efecto de cavitación, cuando la apertura de la válvula es mínima en velocidades altas. Para esto, se calcula el índice de cavitación, σ_v , para las condiciones de diseño o de operación de la válvula, con la siguiente ecuación:

$$\sigma_v = \frac{P_{ev} - P_V}{P_{ev} - P_{sv}} \quad (4.3)$$

Donde:

σ_v = índice de cavitación de la válvula en condiciones de operación o diseño, adimensional.

P_{ev} = Presión de la tubería, medida a una distancia de un diámetro aguas arriba de la válvula, en kg/cm^2

P_V = Presión de vaporización del agua, para el agua a una temperatura de 18°C es igual a -0.97 kg/cm^2 o también es -0.96 bares.

P_{sv} = Presión en la tubería, medida a una distancia de 10 diámetros aguas abajo de la válvula, en kg/cm^2

Después de calcular el índice de cavitación de la válvula, se compara contra el índice de cavitación incipiente, σ_{iv} , (condición en la cual se presenta el fenómeno de cavitación) obtenido por los fabricantes, para el tipo o modelo de válvula que se pretende instalar:

$$\sigma_v > \sigma_{iv} \Rightarrow \text{No hay riesgo de cavitación} \quad (4.4)$$

$$\sigma_v \leq \sigma_{iv} \Rightarrow \text{Hay riesgo de cavitación} \quad (4.5)$$

Ejemplo)

Para válvulas de asiento plano, usadas para control automático, el índice de cavitación incipiente reportado por el fabricante se obtiene con la gráfica de la Figura 4-34, de donde se puede calcular que el índice incipiente de cavitación para este tipo de válvula tiene un valor de $\sigma_{iv} = 1.45$.

Ejemplo)

En un proyecto de sectorización de la red de una ciudad se propuso colocar una válvula reductora de presión en la conducción que deriva agua hacia un sector. Los valores de diseño son: a) presión a la entrada de la válvula igual a 6.8 kg/cm^2 ; b) Presión a la salida de la válvula de 1.0 kg/cm^2 . Determinar si la válvula de control automático de asiento plano está en riesgo de que se produzca cavitación, debido a la apertura que se genera al proporcionar la presión de consigna a la salida. Si resulta que se presente la posibilidad del efecto de cavitación, entonces proponer la presión mínima permisible para que no se ocurra este fenómeno.

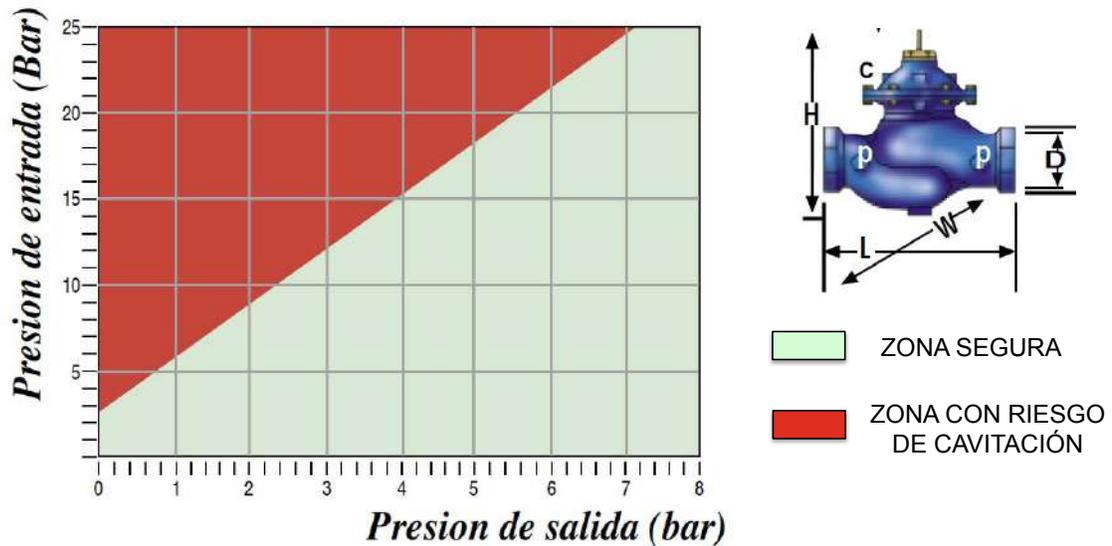


Figura 4-34. Gráfica de fabricante para determinar riesgo de cavitación en válvulas de asiento plano de control automático.

Fuente. Catálogo Dorot, válvula serie 300.

Solución)

El índice de cavitación de la válvula en condiciones de diseño se obtiene al sustituir valores en la ecuación 4.3, como sigue:

$$\sigma_v = \frac{6.8 - (-0.97)}{6.8 - 1} = 1.33$$

Comparando este valor con el índice incipiente de cavitación, que en el caso particular de este tipo de válvulas es igual a 1.45, resulta:

$$\sigma_v = 1.33 \leq \sigma_{iv} = 1.45 \quad \therefore \text{existe riesgo de cavitación en la válvula del ejemplo}$$

Entonces, la presión mínima para evitar este riesgo de cavitación se calcula despejando de la ecuación 4.3 a la presión de salida de la válvula, esto es:

$$P_{sv} = P_{ev} - \frac{P_{ev}}{\sigma_{iv}} = P_{ev} \left(1 - \frac{1}{\sigma_{iv}} \right) = 6.8 \left(1 - \frac{1}{1.45} \right) = 2.11 \text{ kg/cm}^2$$

Esto se quiere decir que aguas debajo de la válvula no puede consignarse una carga de presión menor a 21.1 metros de columna de agua, ya que de lo contrario cavitará la válvula; entonces, el diseño del sector se revisa nuevamente con el modelo de simulación hidráulica con esta consigna, para verificar que dentro de él se cumplan las presiones permisibles por especificación.

Bibliografía

[4.1] Antill, J. Y Woodhead R. (1975) Método de ruta crítica y su aplicación a la construcción, Editorial Limusa, México.

[4.2] Ochoa, A. (2000) Serie autodidacta de medición de agua, Métodos y sistemas de medición de gasto” CONAGUA-IMTA, Noviembre, México.

[4.3] CONAGUA (2009) Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable, Comisión Nacional del Agua - Watergy, Noviembre, México.

Referencias

[4.1] NORMA Oficial Mexicana NOM-001-CONAGUA-2011, Sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario-Hermeticidad-Especificaciones y métodos de prueba; Publicada en el Diario Oficial 17 febrero de 2012.

Proyectos de referencia

[4.1] “Eficiencia electromecánica, física y de la operación hidráulica de la red agua potable de Parral, Chihuahua” Informe JMAS-Watergy Jun. 2007, México.

[4.2] “Modelación de la red de distribución de agua potable y rediseño de distritos hidrométricos de la delegación Iztapalapa, SACM-SHIPSA, Diciembre de 2011, México.

[4.3] “Construcción de cinco DH en el sector No.2 en la ciudad de Morelia, Mich.” Informe, OOAPAS-PROHIDRO, Nov. 2007, México.

[4.4] “Construcción de cinco DH en el sector No.3 en la ciudad de Morelia, Mich.” Informe, OOAPAS-PROHIDRO, Nov. 2007, México.

[4.5] “Sectorización de la red de distribución de Agua Potable de Cuernavaca, Morelos, Segunda Etapa” Informe, SAPAC-SHIPSA, Mzo. 2009, México.

[4.6] “Asesoría y supervisión de la implantación del proyecto de eficiencia hidráulica del sistema de agua potable de Zihuatanejo, Gro” Informe, CAPAZ-SHIPSA, Enero de 2007, México.

[4.7] “Proyecto de micro-sectores piloto para la obtención de parámetros de control de pérdidas de agua en la zona A de la ciudad de México” Proactiva-SAPSA, Feb. 2011, México.

[4.8] “Proyecto de eficiencia física y de la operación hidráulica de la red de agua potable de Zihuatanejo, Gro.” Informe, CAPAZ-SHIPSA, Jun. 2006, México.

[4.9] “Proyecto de sectorización y detección de fugas del sistema de agua potable de Tejalpa Morelos” Informe, SLAPTAC-SHIPSA, Jun. 2008, México.

Ligas internet

[4.1] http://www.priisa.com.mx/pdf/balanza_pesos_muertos.pdf



CAPÍTULO 5

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

5.1 FUNDAMENTOS DE LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE

5.1.1 Conceptos generales

Las obras de los servicios de agua potable deben cumplir su propósito después que se construyen en una ciudad y permanecer en buenas condiciones operacionales durante su vida útil, con estándares de calidad y rentabilidad.

Por lo tanto, el organismo operador del sistema de abastecimiento de agua potable debe realizar continuamente actividades regulares y extraordinarias de mantenimiento y operación, o de lo contrario, la infraestructura se deteriorará poco a poco, primero con el desgaste en los acabados de las obras y equipos; luego ocurrirán pequeñas fallas de empaques, juntas, sellos y partes móviles; posteriormente se presentarán descomposturas en algunos de los elementos, o bien algunos conductos se incrustarán, taponearán o sufrirán corrosión; hasta que finalmente sobrevenga el colapso de estructuras y equipos, que los pondrán fuera de servicio, provocando ineficiencias y costos importantes para la comunidad.

Cuando la infraestructura está nueva, las actividades de mantenimiento son relativamente sencillas y económicas, pero si los elementos del sistema se deterioran por la falta de éste, entonces se vuelven más complicadas y costosas las reparaciones. Por lo tanto, la práctica del mantenimiento preventivo, brindará ahorros considerables al organismo operador, sostendrá la eficiencia y alargará la vida útil del sistema.

El personal de operación y mantenimiento debe contar con los catálogos, manuales de operación, planos y memorias descriptivas de todas las instalaciones, para que puedan reparar la infraestructura, de acuerdo con las especificaciones del proyecto original y de los fabricantes respectivos. En el caso especial de los sectores hidrométricos de la red, para poder llevar a cabo esta tarea, se necesita contar con los planos actualizados de las instalaciones existentes y los modelos de simulación hidráulica del proyecto de sectorización de la red. Si estos planos y modelos no existen, o no tienen toda la información de las obras ejecutadas, como: cortes, reconexiones, sustituciones ampliaciones de tuberías, válvulas, etcétera, se debe solucionar este problema como primer paso.

Un problema de suma importancia que se presenta en varias ciudades del país, es la deficiencia en el manejo del agua de los sistemas de abastecimiento de agua potable. Por lo general, se minimiza la complejidad que representa la infraestructura y los procesos que engloba esta obra de ingeniería hidráulica. Es común manipular válvulas para asignar agua de manera discontinua “tandear el agua”, reparar de emergencia equipos de bombeo que se dañan, cerrar válvulas para evitar el vaciado o derrame del agua en tanques y cárcamos de bombeo, reparar tubos que se rompen por sobrepresiones del agua, etc. Frecuentemente, el control operacional se realiza sin el apoyo de modelos de simulación hidráulica, no existen válvulas de control automático, ni registro continuo de parámetros hidráulicos y eléctricos, no se programan mantenimientos preventivos, entre otros. Estas, y otras, son las causantes de la discontinuidad del servicio de agua y en los bajos niveles de presión del agua en los domicilios.

Para aminorar estos problemas operacionales, es conveniente recolectar periódicamente registros estadísticos de mediciones de campo sobre: análisis de calidad del agua de varios puntos del sistema de abastecimiento, caudales suministrados por las obras de captación, consumos de usuarios, presiones en las tuberías, niveles de tanques, errores de exactitud de medidores, eficiencia de equipos de bombeo, y valores y tipos de fugas reparadas. Asimismo, es necesaria la conformación de un modelo de simulación

hidráulica del sistema de abastecimiento, que sirva de guía en la toma de decisiones de operación y ampliación de la red.

En los siguientes capítulos, de esta unidad se describen los elementos importantes sobre operación y mantenimiento, que se deben practicar continuamente en los sistemas de agua potable que operan con sectores hidrométricos integrados en la red, con el fin de conservarlos en la máxima efectividad su propósito.

5.1.2 Finalidad y metas

Operar y mantener un sistema de agua potable consiste en dar cumplimiento a los propósitos de contribuir a la preservación de la salud de los habitantes de la localidad donde ha sido construido.

El sistema de abastecimiento de agua de una población funciona ininterrumpidamente y al igual que cualquier proceso continuo está sujeto a fallar en cualquier momento, ya sea por errores humanos, deficiencias en los elementos, deterioro de los materiales, desgaste de equipos, problemas logísticos, eventos de la naturaleza, agentes externos, etcétera.

Este proceso de operar y mantener el sistema de agua potable es lo que sostiene la calidad y rentabilidad del servicio a la comunidad. Si se hace correctamente, las fallas serán mínimas, la infraestructura tendrá una vida útil mayor y los costos operacionales serán menores; pero si no se practica adecuadamente, el sistema funcionará con ineficiencia y provocará el incremento de los costos con un mal servicio, aunque haya sido diseñado y construido apropiadamente.

Las actividades de operación y mantenimiento son muy variadas, algunas son tan sencillas como barrer, quitar polvo, atornillar, revisar carátulas de instrumentos, mover una válvula, limpiar tapas, etc.; y otras tan complicadas como rehabilitar un pozo, sustituir la instalación de un equipo de bombeo, renovar una tubería, instalar un sistema de telemetría, reparar los mecanismos de una planta potabilizadora, controlar una fuga de un acueducto. Es por ello que establecen prioridades y se clasifican las actividades en orden de relevancia, para programarlas y destinar los recursos respectivos, sin olvidar la finalidad y las metas de la operación y mantenimiento.

Según la finalidad, las acciones de operación y mantenimiento se clasifican de acuerdo con los propósitos particulares del sistema de abastecimiento de agua potable, tal como se muestra en la *Figura 5-1*.

La restitución de la infraestructura es una actividad que merece atención especial, ya que es complementaria al mantenimiento regular y extraordinario, y aplica cuando un elemento del sistema o un grupo de elementos se deteriora demasiado, siendo necesario renovarla o rehabilitarla completamente, en lugar de seguir reparando las fallas que ocurren, ya que deja de ser rentable continuar con esta actividad y la calidad del agua se afecta continuamente.

Todas las labores de operación, mantenimiento y restitución deben estar apoyadas en un archivo de información base, que contenga registros, planos y estadísticas; y que el organismo operador debe proveer herramientas, equipos y materiales, capacitación y entrenamiento, para el mejor desempeño de su personal. Asimismo, es recomendable disponer de un manual de operación y mantenimiento, para conseguir las metas bajo especificaciones y normas vigentes.

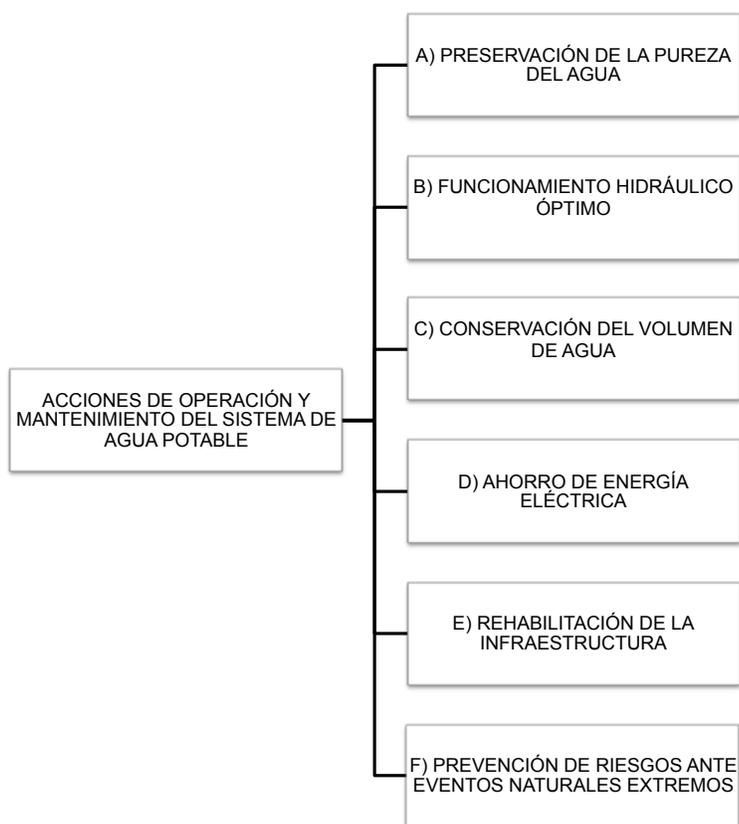


Figura 5-1. Acciones de operación y mantenimiento de sistemas de agua potable, según su finalidad.

En resumen, la operación y el mantenimiento de un sistema de agua potable tiene como finalidad y metas sostener la calidad del diseño y la construcción, para lograr un servicio eficiente y de calidad a los pobladores de una ciudad, soportado con recursos humanos y materiales bajo la responsabilidad del organismo operador.

5.1.3 Archivo de información base

El archivo de información base es el conjunto de registros, planos y estadísticas sobre el desarrollo técnico del sistema de agua potable, alcantarillado y saneamiento. El archivo de información base es necesario para que el mantenimiento y la operación sean eficientes.

Puesto que la red de distribución está enterrada bajo las calles de la ciudad, o el sistema se modifica con el paso de los años, o se renueva su infraestructura, el archivo de información base del sistema es pieza fundamental, puesto que es independiente de la memoria de los trabajadores y ayuda a prevenir la pérdida de datos importantes, cuando los empleados renuncian o mueren.

Además de que ayudan en la optimización de la operación y del mantenimiento, los registros, planos y estadísticas también facilitan los trabajos de planeación de ampliaciones, rehabilitaciones, mejoramiento operacional del sistema, ahorro de energía, control de fugas, atención de emergencias, etcétera.

El archivo de información base de la operación y el mantenimiento del sistema de agua también provee datos vitales para que otros servicios urbanos, que se distribuyen por el suelo, como el teléfono, gas, energía eléctrica, alcantarillado, no interfieran con el servicio de agua potable.

Por lo tanto, el organismo operador del sistema de abastecimiento de agua potable debe conformar y actualizar continuamente un archivo de información base, preferentemente utilizando medios digitales, para posibilitar su almacenamiento, consulta y su monitoreo periódico. Este archivo de información base se recomienda clasificarlo de la manera siguiente:

- a) *Registros*
 - Infraestructura.
 - Diagramas y especificaciones.
 - Hidrológicos.

- b) *Planos*
 - Infraestructura.
 - Redes.

- c) *Estadísticas*
 - Hidráulicas.
 - Electromecánicas y eléctricas.
 - Reparación y rehabilitación.
 - Calidad del agua.

5.1.3.1 Registros

Los registros de la infraestructura normalmente concentran los datos técnicos de pozos, estaciones de bombeo, tanques de regulación, captaciones subterráneas o superficiales, plantas potabilizadoras y de tratamiento, cajas de válvulas, entre otras. Generalmente, se utilizan fichas técnicas por cada elemento, donde se reportan datos de nombre, ubicación, croquis de fontanería, capacidad hidráulica, parámetros eléctricos y mecánicos, estado físico, y cualquier información que aporte características importantes sobre dicho elemento; es recomendable que también incluya fotografías generales y de detalles. La elaboración de las fichas se realiza con el procedimiento descrito en el *inciso 2.3.2.2* de este libro.

Además de las fichas, conviene elaborar cuadros resumen que incluyan todas las obras, para efectos comparativos, reportes, etc. También, es importante tener datos de los medidores, válvulas automáticas, equipos para control de efectos transitorios, entre otros.

Una serie de registros que son útiles para las labores de operación y mantenimiento son los diagramas y especificaciones de equipos, tuberías, diseños, procesos de plantas, etc. Estos expedientes comúnmente los proporciona el fabricante o la empresa constructora que brindó algún servicio al sistema. Ejemplos de este tipo de registros son los diagramas de procesos de plantas de tratamiento, las curvas de operación de los equipos de bombeo, las especificaciones de tuberías y normas vigentes oficiales. Se recomienda que las especificaciones se concentren en el área técnica del organismo operador en formato

electrónico, pero que se coloque en forma gráfica en el sitio donde se encuentra el equipo u obra determinada.

Los registros hidrológicos son elaborados por oficinas de gobierno, institutos, universidades y tratan sobre los aspectos climáticos de la región, tales como temperatura, lluvia, escurrimientos, niveles freáticos del subsuelo, presencia de huracanes, etc. En principio, es necesario que se recopilen y archiven los datos de las estaciones hidrológicas cercanas a la localidad, indicando los instrumentos instalados, la información que se registra y los teléfonos oficiales de la institución encargada.

Se insiste en la conveniencia de realizar la actualización de los registros al menos cada tres meses, con la finalidad de disponer información veraz y oportuna; asimismo, mantener los archivos en formato digital dentro de una computadora (con respaldo) agiliza la consulta y el almacenaje de la información.

5.1.3.2 Planos

Los planos son dibujos esquemáticos de las estructuras, equipos y trazo de tuberías de la red, que ilustran claramente los detalles constructivos de las obras e instalaciones del sistema de agua potable, alcantarillado y saneamiento. A este conjunto de planos también se le conoce como “Catastro de la infraestructura y redes”.

Es relevante comprender que los planos son dibujos de ingeniería y por ello deben ser elaborados con símbolos establecidos y de uso oficial, como por ejemplo los que ha publicado la Comisión Nacional del Agua, en sus manuales y especificaciones (ver *inciso 2.3.2.1*).

Es recomendable también que, aunque los planos sean conformados por personal de informática, deben ser supervisados por ingenieros para que cumplan con las especificaciones vigentes del organismo operador y reflejen las características detalladas de las obras e instalaciones del sistema.

Con frecuencia se observa que el área de operación tiene sus propios planos, el área de diseño y planeación dispone de otros con diferencias a veces significativas; también en varias ocasiones los planos de diseño modificados por los constructores durante la ejecución de las obras, o de los cambios realizados por el área de mantenimiento, no son transferidos a las otras áreas del organismo operador. Esto provoca que con el paso del tiempo no se tenga una versión única, completa y confiable de los planos del sistema. Una buena práctica de organización en este sentido es implementar procedimientos para el ordenamiento y actualización continua del catastro de la infraestructura y redes, donde se definan las interacciones entre las diversas áreas del organismo operador y se determine la unidad responsable que concentre, cambie, actualice o modernice dicho catastro de manera continua y segura.

Los planos que se elaboran para apoyar las actividades de operación y mantenimiento de un servicio de agua urbano se clasifican en función del tipo de sistema específico, como se muestra en la *Figura 5-2*.

Los detalles para elaborar los planos del sistema de agua potable se muestran en el *subinciso 2.3.2.1*. Se reitera la conveniencia de actualizar constantemente los planos cuando exista cualquier tipo de modificación, y disponer los planos en archivos digitales. Para facilitar estas tareas se puede trabajar en el programa comercial *AutoCad*, muy utilizado en la ingeniería y con amplio soporte técnico; o bien, en un sistema de información geográfica (GIS), como el *Arc View*.

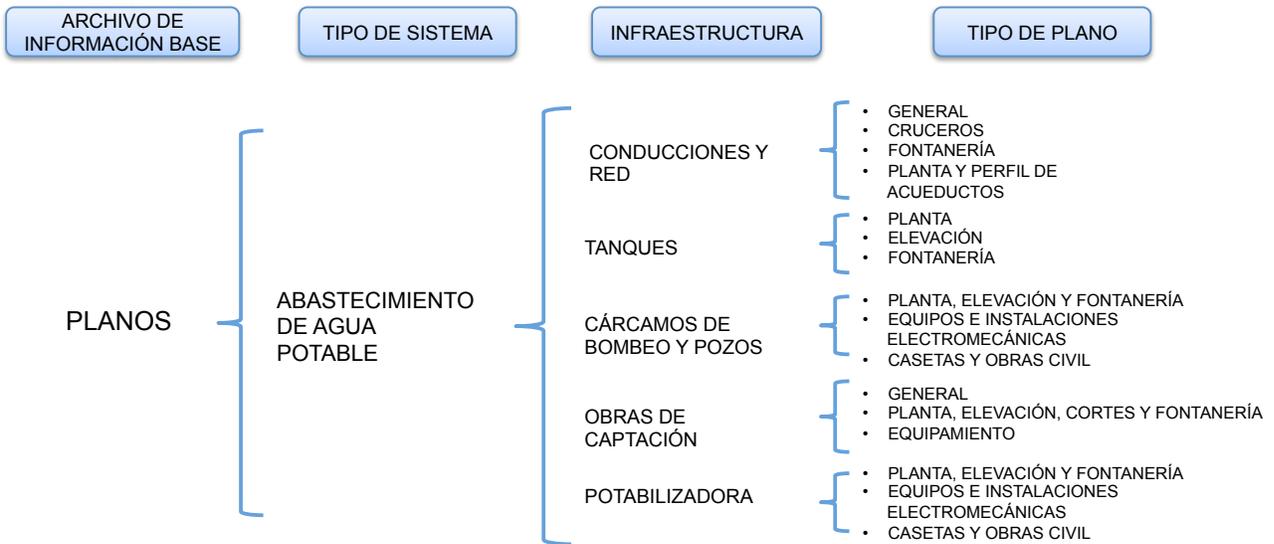


Figura 5-2. Clasificación de planos en un sistema de agua potable.

5.1.3.3 Estadísticas

Las estadísticas son datos cuantitativos de los sucesos cotidianos que se presentan durante la operación y mantenimiento del sistema de agua potable. Los datos se originan de mediciones de parámetros hidráulicos y de calidad de agua en diferentes partes del sistema de agua o en las fuentes naturales de agua; o bien, se derivan de reparaciones o rehabilitaciones de la infraestructura y redes. También, provienen de servicios administrativos y comerciales del organismo operador, como de recibos de energía eléctrica, compra de productos químicos, materiales y equipos, facturación mensual de usuarios, reportes y quejas, etc.

Debido a que los datos que se pueden recolectar en un sistema de agua en operación son inmensos, se hace una selección de la información para optimizar su rendimiento y aprovechar los recursos. Esto, porque en muchas ocasiones se miden, recolectan y almacenan datos que nunca son utilizados, lo cual desmotiva a los operadores al grado de que tarde o temprano dejan esta actividad. Por lo tanto, es mejor elaborar estadísticas sencillas que se utilicen en la toma de decisiones de la operación y el mantenimiento, que hacer de estadísticas trabajosas que no se aprovechan en absoluto.

Las estadísticas básicas que requiere realizar un organismo operador, para una buena gestión de la operación y mantenimiento de sistema de agua potable, son las siguientes:

a) Estadísticas de mediciones hidráulicas

- *Generales:* Temperatura, intensidad de lluvia y evaporación.
- *Captaciones:* niveles de acuíferos y lagos, escurrimientos en ríos.
- *Pozos:* Caudales, presiones, niveles dinámicos.
- *Tanques:* Niveles de agua, caudal de entrada y salida.
- *Conducciones:* Caudales, presiones.
- *Rebombeos:* Caudales, niveles, presiones de descarga.

- *Red de distribución*: áreas de influencia del servicio, horas de suministro, caudales a la entrada de sectores y distritos hidrométricos, presiones en tuberías principales.
- *Medidores*: Pruebas de exactitud y calibración.
- *Válvulas automáticas*: presiones y caudales.
- *Potabilizadoras*: Caudal de entrada y salida, presiones y caudales en los procesos.

En la *Figura 5-3* se muestran algunas imágenes de mediciones hidráulicas para elaborar estadísticas.



Figura 5.3.a. Medición de caudal y presión en una tubería.



Figura 5.3.b. Medición del nivel dinámico del agua en un pozo.

Figura 5-3. Mediciones hidráulicas para elaborar estadísticas de operación del sistema de agua potable.

b) Estadísticas de mediciones de calidad del agua

Se recomienda tener estadísticas de calidad del agua en captaciones, entradas y salidas de tranques y potabilizadoras, red de tubos primaries y tomas domiciliarias. Se practican análisis físicos (turbiedad, color, olor); análisis químicos (ph, contenido de sólidos totales, cloruros, nitratos, dureza, alcalinidad, gases disueltos, metales); análisis microscópicos (presencia de desechos tóxicos); análisis

bacteriológicos (organismos patógenos); análisis radiológico (basuras radiactivas), cloro residual (*Figura 5-4*).



Figura 5-4. Mediciones de calidad de agua en sistemas de agua urbanos.

c) Estadísticas de reparaciones

- *Control de fugas*: Ocurrencia por elemento, material de la falla, ubicación en la red, caudal y presión de fuga, profundidad y tipo de suelo, tiempo de reparación y costo.
- *Reparación de redes*: Ubicación, tipo y características del elemento, tipo de falla, tipo de reparación, costo y rendimiento.
- *Rehabilitación de pozos y equipos de bombeo*: Nombre del pozo o equipo, características del elemento, tipo de reparación, rendimiento y costo.
- *Rehabilitación de redes*: Tramos rehabilitados, diámetros, longitudes, tipo de rehabilitación, rendimiento y costo.
- *Reparación de equipos electromecánicos*: Nombre, ubicación, tipo de falla, tipo de reparación, rendimiento, costo, pruebas físicas.
- *Reparación o rehabilitación de procesos de plantas potabilizadoras*: Nombre, ubicación, tipo de falla y reparación, tiempo de ejecución, costo y rendimiento.

d) Estadísticas de servicios administrativos y comerciales

- *Tomas domiciliarias*: Número, tipo por uso, con y sin medidor, y por clase socioeconómica.
- *Consumo mensual de agua*: por tipo de usuario, con y sin medidor y por clase socioeconómica.
- *Errores de exactitud de micromedidores*: Por tipo y marca
- *Consumo y facturación de energía eléctrica de equipos de bombeo*: Demanda base y hora punta-
- *Consumos unitarios de agua*: Por tipo de uso.
- *Población*: por clase socioeconómica y colonias.

La periodicidad de la recolección y captura de datos depende del tipo de dato y de su importancia en la operación y mantenimiento. Por ejemplo, las mediciones hidráulicas y de calidad del agua se realizan en lapsos cortos, de preferencia diariamente. En cambio, las reparaciones dependen de la

frecuencia con que ocurran; asimismo, los valores de consumos, número de tomas, poblaciones, se realizan de forma mensual.

Con todos los datos estadísticos se elaboran reportes informativos, semanales o mensuales, durante todo el tiempo, dirigidos hacia las diferentes áreas del organismo para la toma de decisiones del mejoramiento de la operación y mantenimiento del sistema de agua urbano.

Es de suma importancia comprender que además de los reportes informativos, los registros, planos y estadísticas actualizados descritos antes, favorecen principalmente a la operación y mantenimiento del sistema de agua, pero también son muy útiles y ahorran muchos recursos cuando se realizan nuevos diseños, ampliaciones, estudios de planeación, proyectos de inversiones y acciones de incremento de eficiencia.

5.1.3.4 Manual de operación y mantenimiento

El manual de operación y mantenimiento de un sistema de agua potable es un documento o una serie de documentos, avalados por las autoridades del organismo operador. Se diferencia del reglamento de un servicio de agua, cuyo carácter es de tipo legal, normativo y de cumplimiento de las obligaciones y derechos de los usuarios y de la responsabilidad del organismo operador, para el otorgamiento contratos, facturación, suministro y calidad de agua, régimen de tarifas, usos fraudulentos, sanciones, entre otros. Por su parte, el manual de operación y mantenimiento está constituido para describir los procedimientos técnicos e instrucciones organizativas, que se aplican en el desarrollo de estas actividades en el sistema de agua potable. El manual contiene especificaciones, diagramas, planos, modelos, métodos para atender situaciones regulares y de emergencia.

El manual de operación y mantenimiento es exclusivo del sistema de agua potable, puesto que se refiere a las instalaciones propias, a su infraestructura y su administración. El manual incluye lo siguiente:

- Descripción general de la operación de cada componente del sistema.
- Procedimientos de mantenimiento preventivo.
- Procedimientos de mantenimiento correctivo.
- Herramientas y equipos.
- Formatos de campo.
- Seguridad y protección.
- Plan de emergencia.
- Organización y administración de recursos.

El manual debe ser de fácil interpretación por el personal de operación y mantenimiento. Ellos, generalmente tienen un sentido más práctico que teórico y por consiguiente les resulta más didáctico si el manual contiene imágenes, diagramas, fotografías, formatos de campo, etc. (*Figura 5-5*).

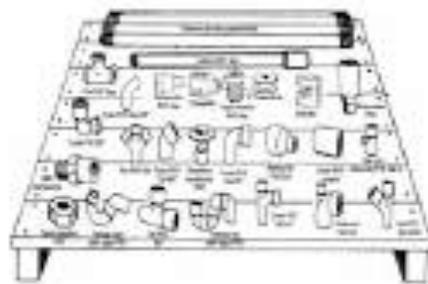
Finalmente, es conveniente mencionar que la vigencia de los manuales debe ser de un año, por lo que se deben tomar las precauciones necesarias para realizar su actualización continua.

la inspección el tipo de trabajo que se realiza en las áreas de operación y mantenimiento, los valores de la economía que prevalecen dentro del sistema de abastecimiento de agua, las oportunidades del mercado, la eficiencia de los equipos y la actualización permanente de tecnología de punta.

Con la finalidad de disponer en el almacén de las piezas cuando deba realizarse alguna reparación correctiva, se establece una relación y programación de aquellas piezas, repuestos, herramientas y materiales que son de uso rutinario y consumibles. También, se programa la compra de piezas y repuestos para desarrollar el mantenimiento preventivo.

Los equipos y herramientas, tales como bombas de achique, malacates, rotomartillos, cortadoras, etc., se utilizan muchas veces en diferentes situaciones de mantenimiento, por lo cual todo el personal de operación y mantenimiento debe tener acceso a ellas. Entonces, se implementa un mecanismo para realizar los préstamos y devoluciones en buen estado.

Existen en el organismo operador del sistema de agua potable equipos mayores, como las compactadoras de rodillos, retroexcavadoras, grúas, etc., que por su naturaleza son operados por personal especializado y tienen mantenimiento preventivo y correctivo propio. En la *Figura 5-6* se muestran algunas herramientas y materiales que comúnmente se utilizan en la operación y el mantenimiento de sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento.



Piezas de repuesto para red
Gobierno regional Cuzco - SANBASUR
<http://www.regioncusco.gob.pe/dirvivienda/attach/Modulo%2004-2009.pdf>



Equipo de seguridad
http://2.bp.blogspot.com/_BjhFmxUJb0M/T06l3etL29I
<http://safe-img04.olx.com.mx/ui/6>



Retroexcavadora
http://gazpachero.blogspot.com/2010_04_01_archive.html



Cortadora de concreto
<http://www.epclogistica.com/productos/5.jpg>



Termofusionadora de tubos
<http://media04-ak.vivastreet.com/classifieds/8b/3/38421558/large>



Bomba de achique
<http://www.viagua.es/images/bomba%20achique.JPG>



Herramientas de albañilería
<http://ww.tandorcomercial.com/uploads/catalogcatimages/full/337.jpg>

Figura 5-6. Herramientas y equipos utilizados en el mantenimiento de sistemas de agua potable.

Los equipos de medición utilizados en la operación y mantenimiento del sistema de agua potable son equipos de medición de caudal, presión, niveles, parámetros físico-químicos, localización de fugas. Su selección depende del objetivo que tendrán, de la disponibilidad del mercado y de las ventajas tecnológicas que ofrezcan. En general, son equipos que los operadores tendrán que transportar a los sitios de medición, por lo que preferentemente se utilizan instrumentos portátiles. Sin embargo, si se van a realizar mediciones de registro continuo se colocarán equipos de medición fijos. En la *Figura 5-7* se muestran algunos de los equipos de medición más utilizados en la operación y mantenimiento de un sistema de agua urbano.



Manómetro para registro de presión en toma domiciliaria
Proyecto de Sectorización 3ª etapa Toluca, AST, 2008



Equipo para prueba de exactitud en micromedidores
Proyecto de Sectorización 3ª etapa Toluca, AST, 2008



Equipo de medición ultrasónica de caudal
SHIPSA, 2011



Manómetro sobre conducción
SHIPSA 2011



Analizador de redes eléctricas
SHIPSA 2011



Equipo de registro en efluentes de agua residual
http://www.palintest.es/palintest/Upload/Image/s/efluente_1.jpg



Equipo para medir cloro residual
<http://www.r-chemical.com/blog/wp-content/uploads/2011/10/DPD71.bmp>



Geófono para detectar fugas
http://www.vicoinstalaciones.es/images/fugas_003.jpg



Sonda eléctrica para medición del nivel del agua en pozos
<http://www.appareil.cl/img/Productos>

Figura 5-7. Ejemplos de equipos de medición utilizados en la operación y mantenimiento.

Los equipos de medición tienen su certificado de calibración, pero con el uso tienden a descalibrarse, por lo que se implementa un programa de revisión y mantenimiento preventivo y se establece contacto cercano con los proveedores de servicio y reparación. Las herramientas, equipos y aparatos de medición se resguardan en un lugar apropiado, donde se facilite su control y se conserven en buen estado, con la supervisión del personal del almacén.

5.1.4.2 Recursos humanos

Aunque se disponga de buenas herramientas y equipos y de un programa de operación y mantenimiento del sistema de agua potable, si no se capacita al personal encargado de estas actividades, los resultados serán ineficientes y costosos, con bajos rendimientos y con altas posibilidades de cometer errores que suelen ocasionar paros del servicio e, incluso, eventos de alto riesgo con pérdidas económicas o de vidas humanas para el organismo operador.

La capacitación se adquiere a través de cursos presenciales, cursos a distancia, talleres, prácticas en campo, folletos, posters, etcétera (*Figura 5-8*), y se enfoca hacia tres aspectos fundamentales, en orden de prioridad como sigue:

1. Seguridad del personal y del sistema de agua.
2. Entrenamiento técnico en el manejo de procesos, equipos y herramientas.
3. Desarrollo humano, comunicación y cultura del agua.



Curso presencial
Proactiva Medio Ambiente CAASA, 2011



Entrenamiento en campo para detectar fugas con helio
Proactiva Medio Ambiente SAPSA, 2011



Curso a distancia
DECFI, UNAM



Manual autodidáctico
IMTA, 2002

Figura 5-8. Medios de capacitación a personal de los sistemas de agua potable.

En el plan de capacitación y entrenamiento que se desee llevar a cabo se consideran niveles de acuerdo con las áreas del organismo operador y con la preparación previa. Para obtener mejores resultados, se establecen cursos para los directivos de la institución, mandos medios técnicos y personal de campo, de forma individual; aunque dependiendo del objetivo que se persiga, en cursos de desarrollo humano e integración es posible aplicar para cualquier nivel del organismo operador.

En la actualidad se está desarrollando e implementando en México el servicio civil de carrera y la certificación de competencias laborales (*Ref 5.1*), el cual se define como “Conjunto de conocimientos, habilidades, destrezas y actitudes que requiere una persona para realizar actividades en el mercado de trabajo” El Consejo de Normalización de Competencias Laborales, CONOCER, fue creado en 1995 con la intención de promover la creación de un sistema nacional de estándares basados en competencia, donde sus funciones abarcan la identificación, normalización, formación y certificación. Derivado de esto, en el año 2010 se instaló el Comité de Gestión por Competencias del Sector Hídrico.

Es por lo tanto muy recomendable que los directores de organismos operadores de los sistemas de agua potable se sumen a estas actividades, promoviendo entre su personal la formación y certificación de sus labores, ya que esto fomentará la disposición de mejores competencias de empleo.

5.2 PRUEBAS DE AISLAMIENTO Y PUESTA EN OPERACIÓN DE SECTORES

Las pruebas de aislamiento de los sectores son fundamentales para asegurar que han quedado limitados físicamente del resto de la red. La verificación resulta relativamente sencilla si en las áreas adyacentes de la red se tiene servicio continuo de agua. De lo contrario, la prueba se complica, ya que se requiere primero poner en operación el sector y, una vez logrado esto, realizar después su prueba de aislamiento.

La puesta en operación de los sectores es un proceso complejo que requiere tiempo, numerosos recursos humanos con habilidades en el manejo de instrumentos de medición, herramientas tecnológicas y conocimiento del funcionamiento del sistema de distribución de agua potable.

La participación del organismo operador de del sistema de abastecimiento de agua potable, es determinante en el desarrollo de las actividades de puesta en operación de la red de distribución de los sectores, pues serán ellos los encargados de aplicar esta metodología cuando se presenten problemas posteriores, durante la suspensión por mantenimiento o reparación.

En este subcapítulo se presenta el proceso para realizar las pruebas de campo para verificar que los sectores han quedado aislados del resto de la red de distribución de agua potable, y poner en operación los sectores de proyecto que se han construido e instrumentado.

5.2.1 Pruebas de aislamiento de sectores y distritos hidrométricos

Desde la planeación y diseño, se establece que los sectores están conformados para que su funcionamiento hidráulico sea completamente independiente de los demás. En algunos casos, dependiendo de los requerimientos del sistema de agua potable, se tendrán interconexiones en los límites, con la finalidad de pasar de agua entre sectores en caso emergencia; no obstante, en operación normal siempre permanecerán cerradas. En cambio, los distritos hidrométricos son pequeñas zonas dentro de cualquiera de los sectores de la red, que se aíslan temporalmente con movimientos de válvulas, a fin de gestionar y optimizar el control activo de fugas. Es por esto que después de que se construyen los sectores y se identifican los distritos hidrométricos, se verifica física y operacionalmente su aislamiento en la red de distribución.

Así, las pruebas de aislamiento de sectores y distritos hidrométricos se realizan entonces con el objetivo de verificar su independencia hidráulica del resto de la red, mediante el cierre del válvulas y la medición de presiones dentro y fuera del sector o distrito del que se trate.

Existen dos formas de comprobar que los sectores o distritos hidrométricos están aislados físicamente del resto de la red:

a) *Corte de suministro hacia el sector.*- El más sencillo y confiable es el de cortar el suministro de agua hacia el sector o distrito, con servicio de agua en las zonas aledañas de la red. Dado que dentro del sector no hay agua, la presión manométrica en las tuberías interiores se vuelven igual a cero.

b) *Suministro de agua hacia el sector.*- La otra manera de comprobar el aislamiento del sector o distrito hidrométrico, sin garantía pero con un alto grado de certidumbre, consiste en suministrar agua hacia el sector, mientras que en las zonas de la red aledañas a él se tenga, o no, el servicio de agua.

A continuación, se describen algunas recomendaciones prácticas para desarrollar las pruebas de verificación del aislamiento de sectores y distritos hidrométricos:

- Se hacen recorridos de campo por el límite del sector aislado, para inspeccionar que efectivamente se encuentren ejecutadas todas las obras propuestas en el diseño y que las válvulas de emergencia se encuentren cerradas.
- Si se suspende el servicio de agua hacia el interior del sector, la prueba se realiza varias horas después, en un tiempo suficiente para que toda su red se vacíe.
- Con manómetros portátiles se mide puntualmente la presión del agua en las tomas domiciliarias dentro y fuera del límite del sector.
- Si la prueba de aislamiento se hace con la suspensión del suministro hacia el sector, la presión dentro del sector debe ser cero o muy cercana a este valor y tendrá valores sustanciales fuera de él.

Ejemplo)

En la Figura 5-9 se presenta como ejemplo un sector, en el se indican los sitios donde se tomaron presiones para verificar su aislamiento físico; se muestran las imágenes de los manómetros utilizados para el registro de presiones y sus valores dentro y fuera de los límites del sector; se observa que los valores dentro del sector son iguales a cero, mientras que fuera de él tienen un valor aproximado de 1 kg/cm², con lo cual se confirma el aislamiento físico de dicho sector.

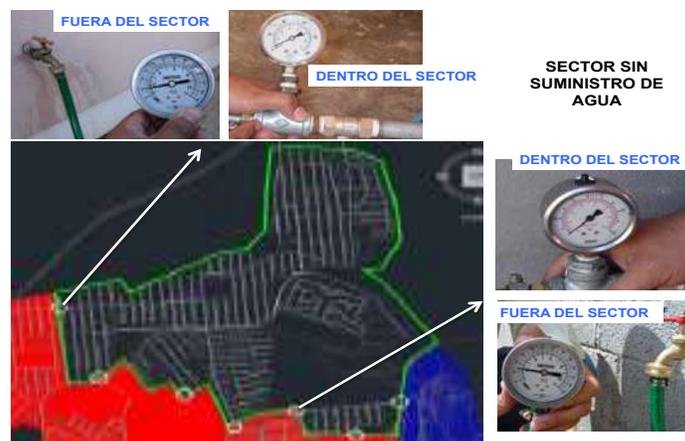


Figura 5-9. Prueba de aislamiento físico del sector sin suministro de agua hacia su interior y zonas de la red aledañas con servicio de agua.

- Cuando no se logre comprobar el aislamiento físico del sector con alguno de los dos procedimientos antes mencionados, se revisan nuevamente los puntos de cierre de válvulas y corte de tuberías en el diseño y en campo, hasta que la prueba de aislamiento resulte positiva.

5.2.2 Puesta en operación de los sectores de la red

La puesta en operación hidráulica de sectores es el proceso inmediato a seguir después de la ejecución de la obra civil, la instrumentación y la prueba de aislamiento de los sectores. La finalidad es lograr establecer el servicio de agua continuo en los sectores y producir las condiciones del funcionamiento hidráulico propuestas en la etapa de diseño.

Cuando se tiene un servicio de agua continuo en la red, las actividades se reducen a verificar presiones, caudales y niveles en los tanques. Sin embargo, en redes de distribución que funcionan con servicio discontinuo, el proceso se vuelve complejo.

Una red que se llena y se vacía en lapsos durante su operación provoca que los usuarios conectados a ella tomen agua todo el tiempo que dura el servicio, para almacenarla en depósitos y cisternas y disponer de agua cuando en la red deja de funcionar; es decir, los usuarios demandan a la red el gasto máximo horario en los lapsos que hay servicio de agua, por lo que la curva de demanda de agua deja de ser una curva con variaciones horarias para convertirse en una línea, casi constante, que disminuye muy poco conforme se van llenando los almacenamientos de los usuarios ubicados en las partes de menor elevación de la red (Figura 5-11).

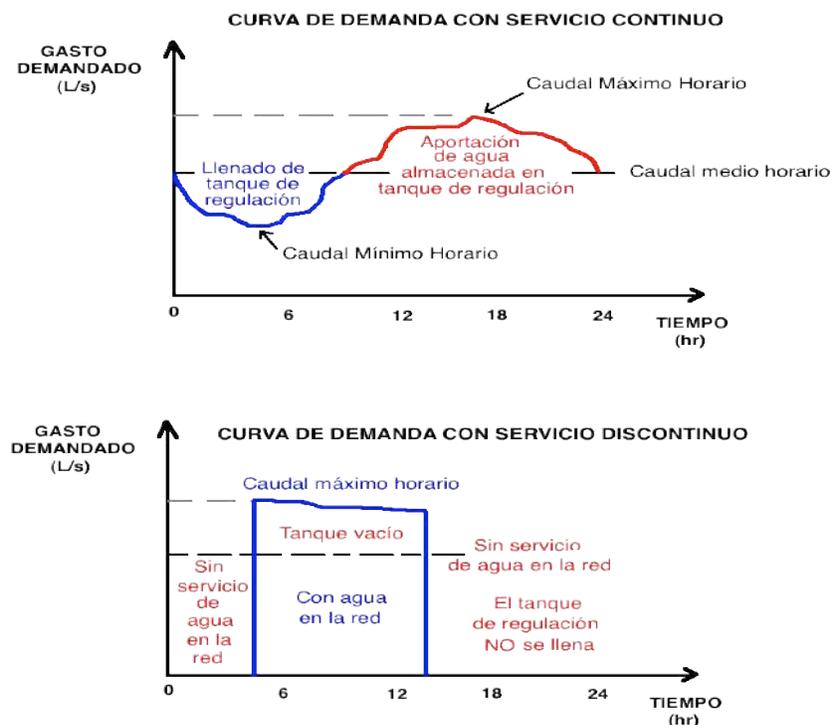


Figura 5-11. Curva de demanda con y sin servicio continuo en la red.

En el momento de tratar de poner en operación algún sector particular, que antes tenía servicio discontinuo en la red, sucede que el gasto de diseño no es suficiente, a veces ni para llenar la red de tuberías que se encuentran por lo general vacías. Esto ocasiona que los tanques de regulación nunca se llenen, el caudal de agua asignado al sector no se pueda suministrar, se generen problemas de desabasto de agua en las zonas de mayor elevación, y por ende, que no se logre establecer el servicio continuo en el sector.

Por lo tanto, para alcanzar la puesta en operación de los sectores, es necesario aplicar un programa de trabajo, que se apoye en una estrategia de operación de acuerdo con las circunstancias operativas y de infraestructura que prevalecen en el lugar.

Aunque no hay un método universal e infalible que garantice a plenitud resultados siempre positivos, a continuación, se presenta un procedimiento que, de acuerdo con las experiencias del autor, colegas y personal de organismos operadores o empresas, se recomienda seguir para llenar de agua a la red de distribución de un sector aislado físicamente (antes con servicio discontinuo) y lograr la puesta en operación que se propuso en su diseño.

- Identificar, en el plano y en campo, subzonas dentro del sector, que puedan ser aisladas temporalmente con movimientos de válvulas de seccionamiento, como se muestra en la *Figura 5-12*. Los círculos en color rojo indican las cajas de válvulas intermedias que servirán de apoyo durante la puesta en operación.

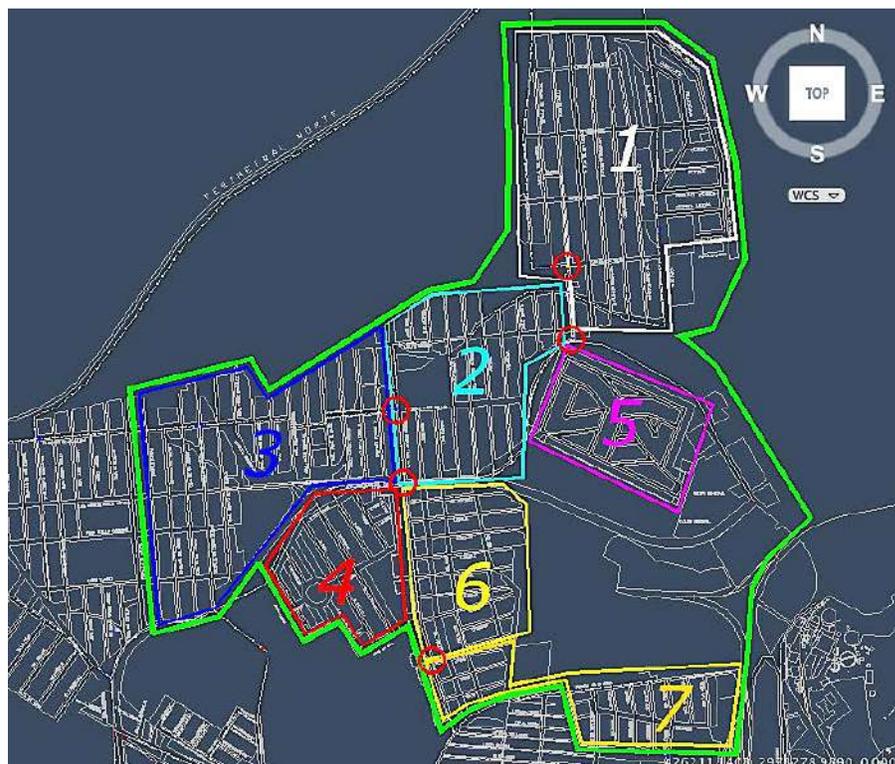


Figura 5-12. Subzonas dentro del sector hidrométrico, aislables con movimientos de válvulas.

- Suministrar el caudal máximo diario de diseño si se trata de un sector que se alimenta de agua de un tanque de regulación, o bien, el caudal máximo horario de diseño si

el suministro de agua es directo a red. En el primer caso, se sugiere llenar previamente el tanque antes de iniciar el suministro de agua al sector.

- Llenar las subzonas de la red que tengan la elevación más baja en el sector (el número de zonas depende del tamaño de las subzonas), durante un tiempo equivalente al lapso que se les otorgaba suministro discontinuo, independientemente si todos los usuarios llenan sus almacenamientos domiciliarios o no.
- Aislar estas subzonas que han sido abastecidas de agua y cambiar el suministro de agua a las siguientes subzonas que se encuentra en una elevación mayor, por un lapso equivalente al tiempo que se suministraba servicio discontinuo, sin importar que todos los usuarios llenen completamente sus almacenamientos domiciliarios.
- Aislar estas subzonas de elevación intermedia y continuar con el mismo proceso a subzonas más altas, hasta que se abarque a todas áreas que existan dentro del sector.
- Después del primer suministro de agua a todas las subzonas del sector, se procede nuevamente a abastecer de agua a las zonas más bajas, luego con las intermedias y así, sucesivamente, hasta llegar a las más altas.
- Se vuelve a repetir este proceso, hasta que poco a poco, los usuarios del sector van llenando su recipientes, cisternas y depósitos domiciliarias red del sector, solicitando cada vez menos agua de la red. Conforme esto pasa, los servicios discontinuos a las subzonas van disminuyendo hasta lograr establecer el servicio continuo en todo el sector hidrométrico.

En la *Figura 5-13* se muestra el proceso esquemático de la puesta en operación de sectores de la red de agua potable.



Figura 5-13. Proceso de la puesta en operación de sectores de la red.

Aquí es importante anotar varias aclaraciones y recomendaciones sobre el desarrollo de este proceso de puesta en operación de sectores:

- En todo el proceso el suministro de agua al sector siempre debe ser permanente, sin interrupciones, hasta que se logre poner en operación continua al sector. Esto en muchas ocasiones implica destinar agua por varios días y dejar sin servicio a otras partes de la red.
- Cuando el sector se abastece por medio de un tanque de regularización, es clave que el tanque nunca se vacíe durante la puesta en operación; se debe sostener siempre el nivel del agua entre su mínimo y máximo.
- Antes de programar e iniciar el proceso de puesta en operación de sectores, se toman en cuenta los horarios de suministro en zonas con servicio discontinuo y los días de menor consumo. También, se evalúa la posibilidad de realizar esta actividad en el horario nocturno.
- Hay que disponer cuadrillas de personal para realizar mediciones de caudal, presión y nivel, en puntos estratégicos de la red, con el fin de conocer y controlar en todo momento el funcionamiento. El modelo de simulación hidráulica del sector debe estar siempre al alcance para cualquier análisis requerido.
- Todas las válvulas reductoras y sostenedoras de presión deben disponer de manómetros para la calibración durante la puesta en operación del sector. Las válvulas de control automático van calibrando a lo largo de todo el proceso de la puesta en operación.
- Siempre será de mucha ayuda realizar previamente una campaña de comunicación a los usuarios, a través de volantes, perifoneo o radio, por un lado, para las personas que viven dentro del sector conozcan las acciones, objetivos y beneficios que el organismo operador persigue y, por otro, se prevengan los usuarios que probablemente sufrirán la escasez de agua durante los días de la puesta en operación.
- Todo el programa de puesta en operación de cada sector de la red de agua potable se documenta para que el personal de operación siga el mismo procedimiento, cada vez que el servicio de agua a la red se suspenda y tenga que ser reestablecido, en paros por reparación o mantenimiento de la infraestructura del sistema.

Aparentemente, las actividades de puesta en operación de sectores parecen sencillas, pero no lo son. Durante el proceso, es muy común que se presenten diversos problemas, entre ellos, se encuentran: cambios de presiones en la red, alteración temporal de la calidad del agua por cambio de trayectorias del flujo, suspensión del servicio a los usuarios durante el proceso, retrasos imprevisibles, tinacos fugas, válvulas cerradas desconocidas, inexistencia de tuberías, extracciones de agua en líneas de conducción desconocidas, válvulas automáticas desarmadas o con falta de accesorios, problemas para calibrar válvulas, entre otras.

Sucede a menudo que, después de suministrar agua a los sectores por varios días y seguir el procedimiento exigido, no se consigue ponerlos en operación con servicio continuo. Esto se debe a dos causas: la primera razón se debe a que los sectores no fueron aislados completamente y que aún existen tuberías en las fronteras por donde el agua está saliendo; el otra, es que los sectores tienen un nivel de fugas y se escapan grandes cantidades de agua por ellas (hay que recordar que en el diseño de los sectores se considera que la dotación tiene un componente del 20% de fugas y si la red presenta niveles superiores a este valor, la puesta en operación requerirá de un caudal adicional al de diseño para que se lleve con éxito).

La forma de solucionar el primer problema es volver a inspeccionar minuciosamente los límites de los sectores, consultando simultáneamente el modelo hidráulico y los planos de los sectores; en ocasiones conviene hacer algunas pruebas hidráulicas, cerrando válvulas en ciertas zonas y registrando presiones y caudales.

El segundo problema de fugas excesivas en los sectores es más delicado, puesto que depende mucho del agua que esté disponible para el suministro hacia ellos. Lo que se recomienda hacer en estos casos es suministrar el caudal de diseño a los sectores aislados físicamente, operarlos con servicio discontinuo por subzonas y, al mismo tiempo, realizar campañas de detección y reparación de fugas en la red, hasta que se alcancen niveles del orden del 20% del agua suministrada.

5.2.3 Evaluación de eficiencia antes y después de acciones en sectores

La sectorización de la red de agua potable ofrece posibilidades importantes para mejorar la eficiencia hidráulica del sistema de abastecimiento, optimizar la reducción y control de fugas de agua, y facilitar la vigilancia del volumen de consumo de los usuarios. Todas las acciones de incremento de eficiencia hidráulica, volumétrica y de facturación tienen que estar reflejadas en el mejoramiento del servicio a los usuarios y en el aprovechamiento efectivo de los recursos del organismo operador del sistema de agua.

La evaluación de la eficiencia hidráulica, volumétrica y de facturación en sectores hidrométricos es una actividad que se apoya en pruebas de campo; se realiza una vez que los sectores han sido aislados e instrumentados y puestos en operación.

La ejecución de las evaluaciones de eficiencia se realiza cada vez que se realicen acciones de mejoramiento de la red, para revisar el cumplimiento de metas, definir nuevas estrategias y acciones, reprogramar actividades y recursos, identificar problemas, y sobre todo para conocer el avance logrado en el mejoramiento del servicio de agua a los usuarios del sistema de abastecimiento de agua potable.

Cuando se determinan por primera vez los parámetros para evaluar la eficiencia hidráulica, volumétrica y de facturación de sectores, es necesario compararlos con estándares establecidos en el ámbito internacional. En la medida en que se realicen nuevamente, la comparación se efectuará contra el anterior, para observar los avances en el incremento de eficiencia logrados.

Las acciones que incrementan la eficiencia hidráulica son las que tienen que ver con la conformación e implementación de sectores en la red, siendo las siguientes:

- Colocación de válvulas reductoras y sostenedoras de presión.
- Cortes de tuberías para limitar el flujo.
- Ampliación de diámetros en algunos tramos de tuberías.
- Reconexión de tuberías para re-direccionar el flujo.
- Reemplazo de válvulas de compuerta.
- Rehabilitación o ampliación de tanques existentes.
- Sustitución de equipos de bombeo ineficientes.
- Instalación de medidores de caudal y presión.

Por su parte, las acciones que incrementan la eficiencia volumétrica son las que mantienen la hermeticidad de la red, entre ellas se encuentran las siguientes:

- Localización y reparación de fugas en tuberías.
- Localización y reparación de fugas en conexiones domiciliarias.
- Localización y reparación de fugas en válvulas.
- Rehabilitación y renovación de tuberías.

- Instalación de válvulas reductoras de presión.
- Reparación de tanques agrietados.
- Sellado de fugas en equipos y accesorios.

Finalmente, las acciones que mejoran la eficiencia de la facturación son incrementan la confiabilidad de los datos de consumo de los usuarios, como:

- Corrección de errores de exactitud de micromedidores.
- Automatización de la lectura del consumo en los micromedidores.
- Implementación de emisión de facturas por computadora.
- Localización de usos irregulares.

Cuando una acción es implementada, es muy conveniente que se conozca con bastante claridad cómo esa acción se ha reflejado en la eficiencia de la red y el servicio a los usuarios, por ello se realiza su evaluación antes y después de que la acción sea hecha.

Para hacer la evaluación de las eficiencias hidráulica, volumétrica y de facturación en sector de la red de distribución, se realizan pruebas de campo, donde se incluyan mediciones de caudales, presiones, consumos, pruebas de exactitud de micromedidores e inspecciones de tomas domiciliarias de usuarios. También, se analiza la información estadística disponible, para complementar los resultados de las pruebas. Es importante señalar que las pruebas se aplican para sectores y distritos hidrométricos.

5.3 EVALUACIÓN DE EFICIENCIA HIDRÁULICA EN SECTORES

La eficiencia hidráulica se define como la relación entre la capacidad de captación, conducción y distribución del agua con la que cuenta un sistema hidráulico de abastecimiento urbano, y la capacidad real con la que funciona dicho sistema (*Ref. 5.2*). No hay un indicador específico para determinar el valor de la eficiencia hidráulica; sin embargo, la manera más práctica de valorarla es a través de los siguientes parámetros, en un período establecido:

a) Consumo unitario doméstico del sector

$$C_{uds} = \frac{V_{ds}}{N_{ps}} \quad (5.1)$$

Donde:

C_{uds} = Consumo unitario doméstico del sector, en L/hab/día.

V_{ds} = Volumen de consumo total doméstico en el sector, en L/día.

N_{ps} = Número de habitantes servidos del sector.

b) Dotación de agua en el sector

$$D_s = \frac{V_{ss}}{N_{ps}} \quad (5.2)$$

Donde:

D_s = Dotación de agua en el sector, en L/hab/día.

V_{ss} = Volumen suministrado al sector, en L/día.

c) Continuidad del servicio de agua en la red

$$IC_{sar} = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} p_{r,i} \times h_{csr,i}}{24} \quad (5.3)$$

Donde:

IC_{sar} = Índice de continuidad del servicio de agua en la red, en hr/día.

$p_{r,i}$ = Porcentaje de cobertura de red o conexiones domiciliarias del sector i, respecto al total de todos los sectores de la red.

$h_{csr,i}$ = Horas promedio de continuidad del servicio de agua de cada sector i.

i = Número de sector de la red.

n_s = Número total de sectores de agua potable en la red.

d) Relación entre caudal suministrado y requerido en la red

$$R_{csr} = \sum_{i=1}^{n_s} \left(\frac{Q_{s,i} - Q_{r,i}}{Q_{s,i}} \right) \times p_{r,i} \quad (5.4)$$

Donde:

R_{csr} = Relación entre el caudal suministrado a la red y el requerido por los usuarios, en %; si la relación resulta positiva existe superávit y si es negativa deficit.

$Q_{s,i}$ = Caudal promedio suministrado al sector i, en L/s.

$Q_{r,i}$ = Caudal requerido por los usuarios en el sector i, en L/s.

e) Presión media del agua en la red de distribución

$$P_{ms} = \frac{\sum_{j=1}^{m_p} P_j}{m_p} \quad (5.5)$$

Donde:

P_{ms} = Presión media en la red del sector, en kg/cm²

P_j = Presión en el jésimo punto de medición en campo del sector, en kg/cm²

m_p = Número de puntos de medición de presión en el sector.

Para calcular estos parámetros de la eficiencia hidráulica, basta con realizar mediciones de caudal por 24 horas continuas en los puntos de suministro de agua de los sectores y registrar presiones simultáneas en varios puntos distribuidos en la red.

Ejemplo)

En la Figura 5-14 se muestra un sector de una red, con la ubicación de los puntos de medición de caudal y presión. Asimismo, se presenta la curva típica de variación de caudal registrada durante 24 horas continuas y los valores de presión medidos en la hora de máxima demanda de agua en el sector.

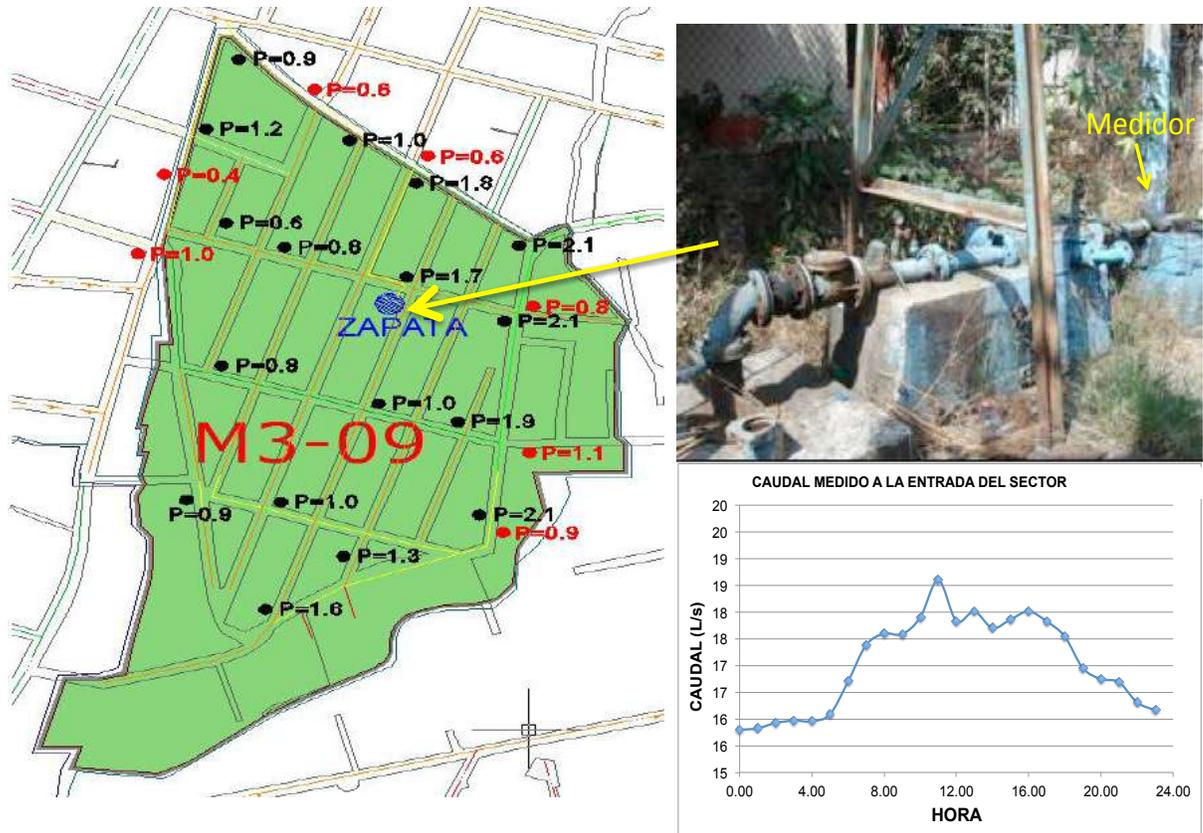


Figura 5-14. Sector de distribución con la ubicación de puntos de medición, curva de variación del caudal y valores de presión en demanda máxima.

Ejemplo)

La red de distribución de un sistema de agua potable está dividida en siete sectores con los datos que se muestran en el Cuadro 5-1. El sector SH-2 tiene únicamente usuarios domésticos, donde se observa de las estadísticas del organismo operador que el volumen de consumo de agua consumo es de 364,636 metros cúbicos en un año, para una población total de 1,986 habitantes, con 584 tomas domiciliarias. Los registros de caudal suministrado al sector SH-2 y los de la medición de presiones, durante una prueba de 24 horas, se muestran en el Cuadro 5-2 y Cuadro 5-3, respectivamente. Se desea, entonces evaluar la eficiencia hidráulica de la red y del sector SH-2, utilizando indicadores.

Cuadro 5-1. Datos de sectores de la red de la ciudad el ejemplo.

SECTOR	HORAS CON SERVICIO DE AGUA	PORCENTAJE DE COBERTURA DE LA RED (%)	CAUDAL SUMINISTRADO (L/s)	CAUDAL REQUERIDO (L/s)
SH-1	10.5	21	8.4	13.8
SH-2	24.0	12	17.0	17.0
SH-3	16.0	15	18.0	29.0
SH-4	24.0	22	15.8	20.6
SH-5	20.0	10	36.0	26.7
SH-6	10.0	13	10.4	10.0
SH-7	24.0	7	19.5	29.9
	SUMA	100	125.1	147.0

Cuadro 5-2. Registros de 24 horas continuas de caudal y volumen suministrado al sector SH2 del ejemplo.

HORA	GASTO MEDIO (L/s)	VOLUMEN ACUMULADO (Litros)
1.00	15.80	56,880
2.00	15.83	56,984
3.00	15.93	57,347
4.00	15.97	57,500
5.00	15.96	57,457
6.00	16.09	57,926
7.00	16.70	60,118
8.00	17.38	62,575
9.00	17.59	63,340
10.00	17.59	63,316
11.00	17.90	64,434
12.00	18.59	66,941
13.00	17.83	64,193
14.00	18.01	64,830
15.00	17.70	63,720
16.00	17.86	64,300
17.00	18.01	64,840
18.00	17.82	64,169
19.00	17.54	63,157
20.00	16.95	61,035
21.00	16.75	60,295
22.00	16.69	60,085
23.00	16.31	58,729
24.00	16.17	58,199
	TOTAL	1,472,371

Cuadro 5-3. Registros de presión de diferentes puntos de la red del sector SH2 del ejemplo.

No. Punto	Presión medida (Kg/cm ²)	HORA	No. Punto	Presión medida (Kg/cm ²)	HORA
1	0.9	10:40	11	0.9	12:15
2	0.4	11:00	12	1	12:30
3	1.2	11:10	13	0.9	12:35
4	1	11:30	14	1.6	12:40
5	0.6	11:45	15	2.1	12:45
6	1.8	11:50	16	1.1	12:48

No. Punto	Presión medida (Kg/cm ²)	HORA	No. Punto	Presión medida (Kg/cm ²)	HORA
7	0.6	11:55	17	1.3	12:52
8	0.6	11:58	18	1.9	12:55
9	0.8	12:02	19	1	13:00
10	1	12:05	20	2.1	13:05
			SUMA	22.80	

Solución)

Le eficiencia hidráulica de la red y el sector SH-2 se realiza aplicando las ecuaciones 5.1 a 5.5, como sigue:

En primer lugar, sustituyendo valores en la ecuación 5.1 se obtiene el consumo unitario doméstico y, en la 5.2, la dotación de agua del sector SH-2, resultando igual a:

$$C_{uds} = \frac{V_{ds}}{N_{ps}} = \frac{364,636 \text{ m}^3 / \text{año} \times 1,000 \text{ L} / \text{m}^3}{1,986 \text{ hab} \times 365 \text{ días} / \text{año}} = 503 \text{ L} / \text{ha} / \text{día}$$

$$D_s = \frac{V_{ss}}{N_{ps}} = \frac{1'472,371}{1,986} = 741.4 \text{ L} / \text{hab} / \text{día}$$

Se observa que el valor del consumo unitario del sector SH-2 resultó alto, para los estándares nacionales e internacionales, los cuales dictan valores de hasta 400 L/hab/día en el caso extremo de uso residencial y clima cálido (ver Cuadro 2-23) y de 100 L/hab/día con acceso óptimo al abastecimiento de agua (ver Cuadro 2-31), respectivamente.

También, como en el sector SH-2 no hay usuarios comerciales, ni industriales, ni de servicios públicos, se deduce que el nivel de pérdidas del sector SH-2 es del orden del 32.1% del volumen suministrado, esto es:

$$\text{Nivel de pérdidas de agua} = 741.4 - 503 = 238.4 \text{ L} / \text{hab} / \text{día}$$

La continuidad del servicio de agua en toda la red se evalúa sustituyendo en la ecuación 5.3 los valores de las columnas dos y tres del Cuadro 5-1, como sigue:

$$IC_{sar} = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} P_{r,i} \times h_{csr,i}}{24} = \frac{0.21 \times 10.5 + 0.12 \times 24 + 0.15 \times 16 + 0.22 \times 24 + 0.10 \times 20 + 0.13 \times 10 + 0.07 \times 24}{24} = \frac{17.745}{24} = 73.9\%$$

La relación entre el caudal suministrado y requerido en toda la red se obtiene sustituyendo los valores de las columnas tres a cinco del Cuadro 5-1, en la ecuación 5.4, resultando los valores del Cuadro 5-4:

Cuadro 5-4. Resultados de la evaluación de la relación entre caudal suministrado y requerido del a red del ejemplo.

SECTOR	PORCENTAJE DE COBERTURA DE LA RED	CAUDAL SUMINISTRADO (L/s)	CAUDAL REQUERIDO (L/s)	$(Q_{s,i}-Q_{requerido})/Q_{s,i}$	MULTIPLICACIÓN $(P_{z,i} * (Q_{s,i}-Q_{requerido})/Q_{s,i})$
SH-1	21%	8.4	13.8	-0.643	-13.5%
SH-2	12%	17.0	17.0	0.000	0.0%
SH-3	15%	18.0	29.0	-0.611	-9.2%
SH-4	22%	15.8	20.6	-0.304	-6.7%
SH-5	10%	36.0	26.7	0.258	2.6%
SH-6	13%	10.4	10.0	0.038	0.5%
SH-7	7%	19.5	29.9	-0.533	-3.7%
SUMA	100%	125.1	147	DÉFICIT	-30.0%

Resulta que la relación de caudales, R_{csr} , en la red es negativa, lo que quiere decir que hay 30 % de agua faltante o déficit, es decir, el caudal requerido es mayor que el agua suministrada a los sectores de la red.

Por último, la presión media en la red se calcula sustituyendo los valores del Cuadro 5-3 en la ecuación 5.5, resultando:

$$P_{ms} = \frac{\sum_{j=1}^{m_p} P_j}{m_p} = \frac{22.8}{20} = 1.14 \text{ Kg / cm}^2$$

Así, resulta que la presión media del sector SH-2 es de 1.14 kg/cm², que es superior a las especificaciones establecidas de 1.0 kg/cm²; no obstante se advierte que hay puntos debajo de este valor límite, por lo que es necesario realizar acciones de redistribución de presiones en el sector.

5.4 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA VOLUMÉTRICA Y DEL NIVEL DE FUGAS EN SECTORES

La eficiencia volumétrica ($\eta_{volumétrica}$) se refiere a la conservación del agua en el sistema de abastecimiento y se calcula en porcentaje (Ref. 3.5), como:

$$\eta_{volumétrica} = \frac{V_{consumo}}{V_{suministro}} \times 100 \quad (5.6)$$

El volumen consumido ($V_{consumo}$) es la cantidad de agua, medida o no, que reciben los usuarios en sus tomas domiciliarias, estén registradas o no en el padrón de usuarios del organismo operador. El volumen suministrado ($V_{suministro}$) es la cantidad de agua producida e introducida a la red. El valor de la eficiencia volumétrica refleja, en buena medida, la capacidad que tiene un sistema de abastecimiento

para entregar el agua inyectada a la red hasta los usuarios y la magnitud del volumen de las fugas existentes.

Desde esta perspectiva, al delimitar cualquier sector hidrométrico, implica que se debe establecer un cálculo exacto del volumen de agua que ingresa y del agua que se consume, en un tiempo perfectamente definido. Por ejemplo, si el período seleccionado para el análisis inicia a las 10:00 horas del día 3 de abril y termina exactamente a las 10:00 horas del día 4 de abril, el volumen suministrado deberá ser precisamente la diferencia de la lectura final del medidor, menos la lectura inicial, registradas a las 10:00 horas. Similarmente, el volumen de consumo será igual a la suma de los consumos de todos los usuarios conectados en el sector, registrados entre las 10:00 del primero al segundo día del análisis.

En la práctica, el registro del agua suministrada se obtiene fácilmente si se instala un medidor de caudal con registro continuo. Sin embargo, la estimación del agua consumida es complicada, debido a lo siguiente:

- En un sector hidrométrico hay una gran cantidad de usuarios y se dificulta realizar las lecturas simultáneamente y exactamente en la hora de inicio y finalización del período de prueba.
- Algunas veces existen usuarios que no tienen medidor o está descompuesto.
- Durante la prueba, varios de los usuarios con medidor no se encuentran en los domicilios o no permiten el acceso a su propiedad para la toma de lecturas.
- Los medidores instalados pueden estar desajustados y arrojar errores de exactitud.
- El personal de lectura puede cometer errores de registro y procesamiento de datos.

Por lo tanto, se han desarrollado métodos alternativos para resolver estos problemas y robustecer las pruebas en sectores hidrométricos, como el muestreo de campo, análisis en períodos prolongados, monitoreo continuo de caudales mínimos, pruebas con cierre de tomas domiciliarias, etc. Desde esta perspectiva, la eficiencia volumétrica de sectores se evalúa con cinco métodos:

- a. Auditoria de fugas de corta duración
- b. Caudal mínimo nocturno
- c. Medición con subdivisión nocturna
- d. Caudal mínimo sin consumo
- e. Indicador de fugas estructural

Los cinco métodos están soportados con pruebas de campo, que se realizan a partir de que se ha comprobado el aislamiento físico del sector hidrométrico.

a) Auditoria de fugas de corta duración

La auditoría de fugas de corta duración consiste en realizar un balance hídrico en un período de un días o máximo una semana. La prueba se aplica mediante el siguiente procedimiento (*Figura 5-15*):

- Cerrar la válvula de entrada de agua al sector, o apagar la bomba o re-bombeo, para que se detenga su abastecimiento de agua.
- Realizar el registro de lecturas en todos los medidores domiciliarios (lecturas iniciales).

- Abrir la válvula de suministro de agua, encender la bomba o re-bombeo y comenzar con el registro continuo de caudales.
- Dejar transcurrir el período elegido (24 horas, tres días o una semana).
- Cuando se cumpla exactamente el período establecido, se vuelve a detener el servicio de agua al DH, cerrando la válvula de entrada, apagando la bomba o re-bombeo.
- Registrar nuevamente las lecturas de los medidores domiciliarios (lecturas finales) y calcular el volumen suministrado en el período, a partir del registro continuo de caudales.
- Calcular el volumen de consumo de agua, restando las lecturas iniciales de las finales de medidores domiciliarios y sumando todas las diferencias.
- Calcular el valor de la eficiencia volumétrica, dividiendo el volumen de agua del consumo total registrado, entre el volumen suministrado en el período (ecuación 5.6).



Figura 5-15. Procedimiento para llevar a cabo la auditoría de fugas de corta duración en campo.

Aunque la prueba parece simple, en realidad es complicada su aplicación en campo, principalmente por la molestia de los usuarios, el acceso a todos los domicilios, el funcionamiento exacto de los medidores, entre otros. Por eso, se toman todas las precauciones, con avisos a los usuarios, revisión de medidores y equipos, etcétera.

Ejemplo)

En un sector (Figura 5-16.a) se realizó una prueba en campo de siete días, para aplicar la auditoría de fugas de corta duración. Se instaló un medidor electromagnético a la entrada del sector, con registro continuo; los micromedidores fueron inspeccionados físicamente y se sustituyeron aquellos aparatos descompuestos o con altos errores de exactitud, por equipos nuevos. Por un lado, los registros del

medidor de la entrada del sector indican que se acumuló un volumen de agua de 3,052.4 metros cúbicos (Figura 5-16.b); por otro, se analizaron las lecturas iniciales y finales de los micromedidores del sector, resultando un volumen de consumo total de los usuarios de 2,163.5 metros cúbicos. Calcular el volumen de fugas que presenta el sector y la eficiencia volumétrica correspondiente.



Figura 5.16.a. Vista en planta del sector hidrométrico del ejemplo de auditoría de fuga de corta duración.

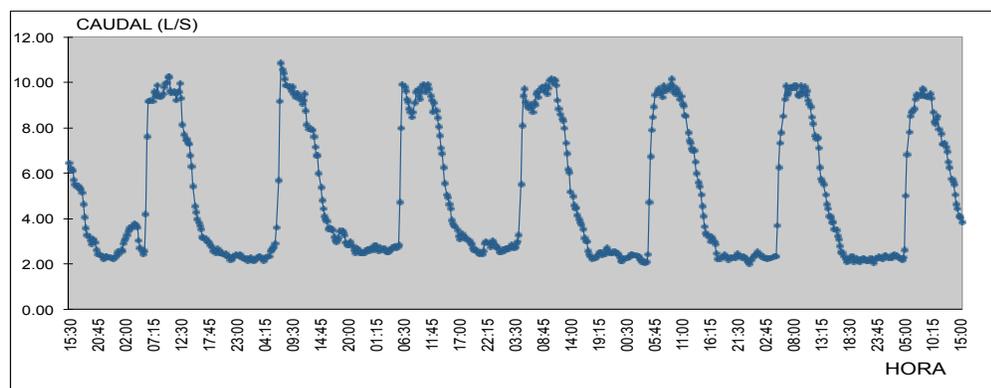


Figura 5.16.b. Registro del medidor electromagnético colocado a la entrada del sector del ejemplo.

Figura 5-16. Vista en planta del sector hidrométrico del ejemplo de auditoría de fuga de corta duración y Registro del medidor electromagnético colocado a la entrada del sector del ejemplo.

Solución)

El volumen de fugas se calcula con la diferencia del volumen suministrado acumulado, menos el volumen registrado en todos los micromedidores del sector, o sea:

$$V_{\text{fugas sector}} = V_{\text{suministro}} - V_{\text{consumo}} = 3,052.4 - 2,163.5 = 888.9 \text{ m}^3 / \text{semana}$$

Ahora, sustituyendo en la ecuación 5.6, la eficiencia volumétrica del sector será igual a:

$$\eta_{volumétrica} = \frac{V_{consumo}}{V_{suministro}} \times 100 = \frac{2,163.5}{3,052.4} \times 100 = 70.89 \%$$

Normalmente, la prueba de auditoría de corta duración es relativamente costosa, debido a que es necesario que todos los usuarios dispongan de micromedidor en su toma domiciliaria y con un sistema de lectura remota (con aproximación de litros), que permita al personal que realiza la prueba acceder al registro de lecturas de dicho micromedidor.

Ante esta disyuntiva, el método de la auditoría de fugas de corta duración se aplica con una variante por muestreo. Esto es, se considera el registro de lecturas de consumo solo en aquellos micromedidores del sector que se encuentren funcionando, estén en buen estado físico, con acceso a la lectura y con un error de exactitud dentro del rango de +/- 2%. Entonces, los resultados de estos consumos se analizan estadísticamente y se extrapolan al resto de los usuarios que no disponen de micromedidor, a los que no es posible hacer el registro de lectura por estar cerrados sus domicilios, y a los que no cuentan con acceso de lectura remota.

Con este método disminuyen sustancialmente los costos y tiempos de la prueba, pero se tiene el inconveniente de disminuir la confiabilidad de los resultados; no obstante, la experiencia indica que es una buena práctica si se establecen bien los parámetros y criterios que se describen en la técnica de la auditoría de agua de la IWA y la AWWA (*inciso 2.5.4*).

b) Caudal mínimo nocturno

El método de caudal mínimo nocturno consiste en realizar una medición continua de caudales durante 24 horas, a la entrada de suministro de agua del sector o DH, para analizar el comportamiento de los caudales mínimos nocturnos, e inferir el nivel de fugas existente en la red, a través del llamado "Índice de Caudal Mínimo Nocturno, *ICMN*", que se calcula con la siguiente ecuación (*Ref. 5.4*):

$$ICMN = \frac{Q_{mínimo}}{Q_{medio}} \times 100 \quad (5.7)$$

Donde:

ICMN = Índice de caudal mínimo nocturno, en %.

Q_{mínimo} = Caudal mínimo, en L/s (consumo mínimo nocturno, CMN).

Q_{medio} = Caudal medio, en L/s (consumo horario promedio, CHP).

La teoría del *ICMN* se basa en la hipótesis de que en la noche los usuarios duermen y sus consumos son muy pequeños, por lo que el caudal suministrado será aquel que escapa por las fugas de la red. No obstante, a la fecha hay pocos estudios que confirman esta hipótesis; generalmente se cumple en sectores con usos domésticos, con medición al 100%, sin depósitos y problemas de fugas dentro de las casas, redes con servicio de agua continuo y donde no existen usos fraudulentos.

El valor del *ICMN* es solamente un indicador del tamaño del problema de fugas en el sector. Si el *ICMN* es mayor al 20% quiere decir que en la red del sector hay un nivel importante de fugas y que es necesario realizar una búsqueda de las mismas de manera intensiva (*Ref. 5.5*). En ningún caso, se debe

interpretar que el valor del ICMN expresa el porcentaje exacto de volumen de fugas en un sector; solamente es un valor aproximado de ello.

Ejemplo)

En un sector hidrométrico completamente aislado del resto de la red, se realizó una medición de caudal en su punto de suministro de agua. La gráfica obtenida en la prueba se muestra en la Figura 5-17. Calcular el índice de caudal mínimo nocturno e interpretar el resultado.

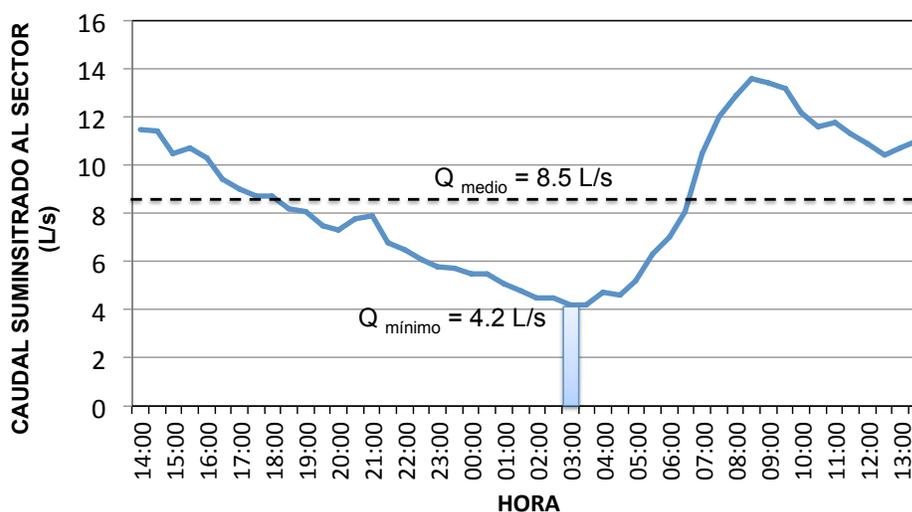


Figura 5-17. Gráfica del registro de caudal a la entrada del sector hidrométrico del ejemplo.

Solución)

Se observa en la gráfica de la Figura 5-17 que por la noche el valor del caudal disminuye, debido al bajo consumo de los usuarios, pero no llega a cero, lo cual indica que hay una posibilidad de fugas en la red.

El valor del índice de caudal mínimo nocturno se calcula con la ecuación 5.7, como sigue:

$$ICMN = \frac{Q_{\text{mínimo}}}{Q_{\text{medio}}} \times 100 = \frac{4.2}{8.5} \times 100 = 49.4 \%$$

Este valor de ICMN es mayor a 20%, por lo que se concluye que existe un nivel de fugas considerable que es necesario inspeccionar más a fondo.

Quando existen consumos industriales, comerciales; hospitales, hoteles o de servicios públicos importantes, aunado a la existencia de depósitos en los domicilios, el índice de caudal mínimo nocturno debe ser determinado con la ecuación siguiente:

$$ICMN_{I-S} = \frac{Q_{\text{min}} - I_{\text{nocturno}} - S_{\text{nocturno}}}{Q_{\text{medio}} - I_{\text{medio}} - S_{\text{medio}}} \quad (5.8)$$

Donde:

$ICMN_{I-S}$ = Índice de caudal mínimo nocturno en sectores con industrias y depósitos, en %.

Q_{min} = Caudal mínimo de suministro al sector, en L/s.

$I_{nocturno}$ = Caudal industrial nocturno medido, en L/s.

$S_{nocturno}$ = Caudal nocturno de llenado de tanques, en L/s.

Q_{medio} = Caudal medio diario de suministro al sector, en L/s.

I_{medio} = Caudal medio diario industrial, en L/s.

S_{medio} = Caudal medio diario de llenado de depósitos, en L/s.

Ejemplo)

En un sector hidrométrico, SH, de 300 tomas domiciliarias se realizó una prueba de caudal durante 24 horas continuas; el caudal mínimo nocturno resultó igual a 3.8 L/s y el caudal medio fue de 13.7 L/s. Dentro del SH existen depósitos domiciliarios con un volumen total de 130 metros cúbicos que se llenan durante todo el día, con un valor mínimo nocturno del 22%. También, en el SH se encuentran conectados a la red cuatro consumidores de tipo industrial que consumen diariamente un promedio de 5, 10, 24 y 30 metros cúbicos, con un valor mínimo en la noche de 67%. Determinar los índices de caudal mínimo nocturno $ICMN$ e $ICMN_{S-I}$ del sector, comparar resultados e indicar qué nivel de fugas existe.

Solución)

El índice de caudal mínimo nocturno se determina sustituyendo los datos en la ecuación 5.7, es decir:

$$ICMN = \frac{Q_{mínimo}}{Q_{medio}} \times 100 = \frac{3.8}{13.7} \times 100 = 27.74 \%$$

Luego, el valor del caudal medio del llenado de depósitos y su caudal mínimo respectivo, se calculan como sigue:

$$S_{medio} = \frac{\text{Volumen depósitos (L)}}{\text{Tiempo (s)}} = \frac{130m^3 \times 1000L/m^3}{24hr \times 3600s/hr} = 1.5 L/s$$

$$S_{nocturno} = S_{medio} \times (\text{porcentaje de variación mínima}) = 1.5 \times (0 - 22) = 0.33 L/s$$

Y el valor del caudal de consumos industriales y su caudal mínimo correspondiente, son:

$$I_{medio} = \frac{\text{Consumo industrial medio (L)}}{\text{Tiempo (s)}} = \frac{(5+10+24+30) \times 1000}{24 \times 3600} = 0.8 L/s$$

$$I_{nocturno} = I_{medio} \times (\text{Porcentaje de variación mínima}) = 0.8 \times (0.67) = 0.54 L/s$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 5.8 se obtiene el índice buscado:

$$ICMN_{I-S} = \frac{Q_{\min} - I_{\text{nocturno}} - S_{\text{nocturno}}}{Q_{\text{medio}} - I_{\text{medio}} - S_{\text{medio}}} \times 100 = \frac{3.8 - 0.54 - 0.33}{13.7 - 0.8 - 1.5} \times 100 = 25.7 \%$$

Los resultados señalan que existe un nivel de fugas en el sector, que es necesario reducir. Además, el consumo de usos industriales y llenado de depósitos tiene influencia en el caudal mínimo nocturno, aproximadamente en un 2.04 %.

En cuanto a los aspectos prácticos del desarrollo de la prueba en campo, es recomendable mantener el suministro continuo de agua al sector alrededor de 24 a 48 horas antes de realizar las mediciones de caudal, para lograr una estabilización en los consumos de aquellas zonas que han interrumpido su servicio previamente.

Por último, es importante mencionar que existen diversas variantes en la aplicación de la teoría de caudal mínimo nocturno en redes de agua potable. Se utiliza para monitorear en forma permanente el comportamiento típico de un sector durante un tiempo prolongado; observando el *ICMN* es posible identificar algún cambio provocado por la aparición de una nueva fuga en la red, o bien, para ir evaluando el *ICMN* ante un programa de reducción de fugas.

c) Medición con subdivisión nocturna

Si en el sector bajo estudio hay una sospecha de la existencia de un nivel alto de fugas, se realiza una prueba nocturna, para puntualizar las zonas que tienen más problemas dentro del sector, usando la siguiente técnica complementaria de medición y análisis:

- Se identifican subzonas dentro del sector, que puedan ser aisladas temporalmente mediante la manipulación de válvulas.

Ejemplo)

En la Figura 5-18 se presenta un sector dividido en seis subzonas Z-1 a Z-6.

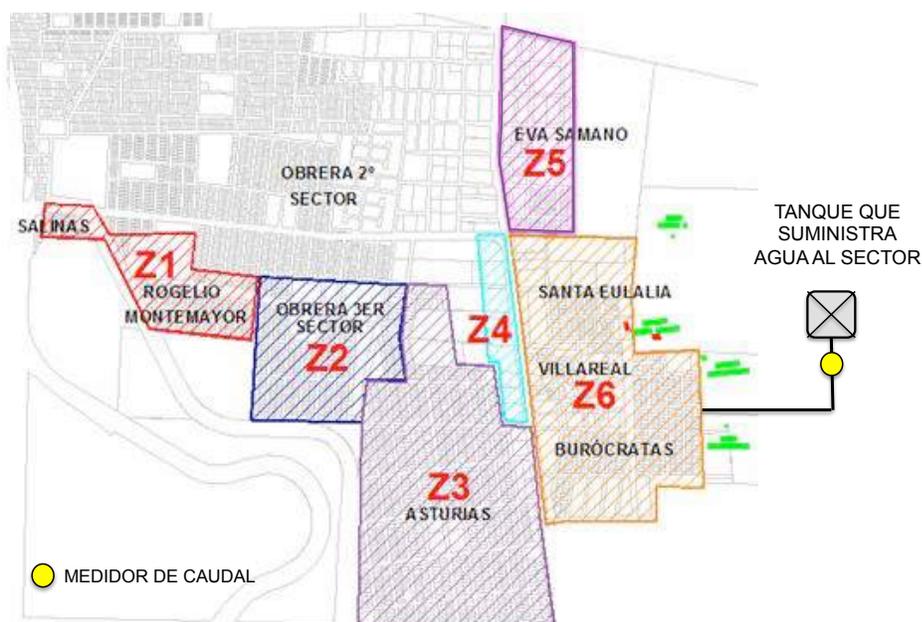


Figura 5-18. Ejemplo de sector con subzonas aislables temporalmente con movimientos de válvulas.

- Se inicia la prueba con todas las válvulas abiertas que aíslan las subzonas dentro del sector. Después de un tiempo de alrededor de 15 minutos se cierra la subzona más alejada del punto de suministro de agua. Al transcurrir más o menos otros 15 minutos, se cierra la siguiente subzona y así sucesivamente, hasta concluir con todas las subzonas e impedir el ingreso de agua al sector. Durante todo el tiempo se registra el caudal de suministro al sector.

Ejemplo)

En la Figura 5-19 se muestra el registro de la medición de caudales obtenido durante la prueba del sector de la Figura 5-18.



Figura 5-19. Registro de caudales durante la prueba de subdivisión nocturna de un sector del ejemplo.

- De los resultados de mediciones entre subzonas, se calcula el Caudal Específico Límite Nocturno, con la ecuación siguiente:

$$CEL = \frac{E \times CMN}{L} \quad (5.9)$$

Donde:

CEL = Caudal específico límite nocturno, en L/s/km.

CMN = Caudal mínimo nocturno, en L/s.

L = Longitud total de la red del sector, en kilómetros.

E = Porcentaje de entrega de agua a los usuarios, calculado con la siguiente ecuación:

$$E = \frac{CMN - C_{fugas}}{CMN} \times 100 \quad (5.10)$$

El valor de E se obtiene de la primera medición nocturna en el sector; en este caso, C_{fugas} es el valor del caudal de fugas ocurrido durante esa noche, en L/s.

Ejemplo)

En el sector del ejemplo, los valores obtenidos en la prueba de caudal mínimo nocturno fueron: $E=63.71\%$, $CMN=17\text{ L/s}$ y la longitud total de la red del sector es de 25.79 km , por lo que el CEL se obtiene al sustituir estos datos en la ecuación 5.9, resultando igual a:

$$CEL = \frac{E \times CMN}{L} = \frac{0.637 \times 17}{25.79} = 0.42\text{ L/s/km}$$

- Después se calculan los caudales específicos nocturnos para cada zona, CEN , en L/s/km, con la ecuación 5.11. Finalmente, se comparan contra el CEL del sector. Si el CEN es mayor que el CEL , la subzona tiene un nivel importante de fugas y es necesario realizar una localización intensiva.

$$CEN = \frac{Q_{nz}}{L_z} \quad (5.11)$$

Donde la variable Q_{nz} es el caudal nocturno en L/s y el parámetro L_z es la longitud de la subzona en kilómetros, respectivamente,

Ejemplo)

Los resultados de la prueba en el sector del ejemplo se presentan en los Cuadro 5-5 y Cuadro 5-6. Se observa que las subzonas Z1 y Z5 el CEN es menor que el CEL , por lo que se concluye que no tienen problemas importantes de fugas.

Cuadro 5-5. Resultados de la prueba de subdivisión nocturna en el sector del ejemplo.

Identificación de válvula	Diámetro	No. Vueltas en la válvula	Hora del cierre	Q registrado en el medidor (L/s)	Q Por zona (L/s)
Estado inicial			02:45	17.00	
Cierre de subzona Z-1	2"	9	03:00	16.00	1.00
Cierre de subzona Z-2	8"	18	03:15	13.00	3.00
Cierre de subzona Z-3	6"	35	03:25	6.00	7.00
Cierre de subzona Z-4	8"	35	03:35	5.50	0.50
Cierre de subzona Z-5	4"	22	03:45	5.00	0.50
Cierre de subzona Z-6	6"	13	04:00	0.0	5.00

Cuadro 5-6. Cálculo del CEN por subzona y comparación con el CEL del sector del ejemplo.

Zona	Caudal por Subzona (L/s)	Longitud de Subzona (km)	CEN por Subzona (L/s/km)	CEL del Sector (L/s/km)	Estatus de Fugas
Z1	1.00	2.88	0.347	0.42	No
Z2	3.00	3.74	0.802		Sí
Z3	7.00	11.02	0.635		Sí
Z4	0.50	0.62	0.806		Sí
Z5	0.50	1.42	0.352		No

Z6	5.00	6.06	0.825	Sí
----	------	------	-------	----

d) Caudal mínimo sin consumo

La prueba de caudal mínimo sin consumo consiste en medir el caudal mínimo, L/s, suministrado al sector durante un período corto, menor a 24 horas, mientras son cerradas sistemáticamente las llaves de todas las tomas domiciliarias de los usuarios conectados a la red dentro de la delimitación de dicho sector.

La evaluación del nivel de fugas con esta prueba se realiza aplicando siguiente expresión:

$$I_{Fugas} = \frac{Q_{\text{mínimo sin consumo}}}{Q_{\text{medio}}} \times 100 \quad (5.12)$$

Donde I_{fugas} es el valor designado como indicador del nivel de fugas en porcentaje; $Q_{\text{mínimo-sin-consumo}}$ es el gasto mínimo estabilizado en el momento en que el mayor número tomas domiciliarias posibles han sido cerradas; Q_{medio} es el caudal promedio obtenido de la medición continua de caudal sin cierre de tomas domiciliarias. Con el indicador I_{fugas} se evalúa la hermeticidad volumétrica de la red, con mayor exactitud que con el índice de caudal mínimo nocturno.

El valor que se obtenga de I_{fugas} , se compara contra con el porcentaje mínimo permisible de fugas; si el porcentaje llega a ser mayor al permisible, se tendrá que hacer recorridos diurnos y nocturnos hasta identificar dichas fugas.

Como es de esperar, esta prueba causa molestias a los usuarios del sector, debido a la falta del servicio de agua, por lo que uno o dos días antes se promueve una campaña de apoyo por medio de volantes escritos y anuncios en los medios de comunicación. Para asegurar que, durante la prueba, las tomas domiciliarias no las abran nuevamente los usuarios, se colocan sellos que impidan el acceso a la llave de dicha toma.

Ejemplo)

A continuación, se presentan los resultados de una de las pruebas de caudal mínimo sin consumo, realizadas en uno de los sectores de la red de agua potable de una localidad. En la Figura 5-20 se muestra la curva de variación del caudal suministrado al sector y en la Figura 5-21 la que se registró durante la prueba de cierre de tomas domiciliarias.

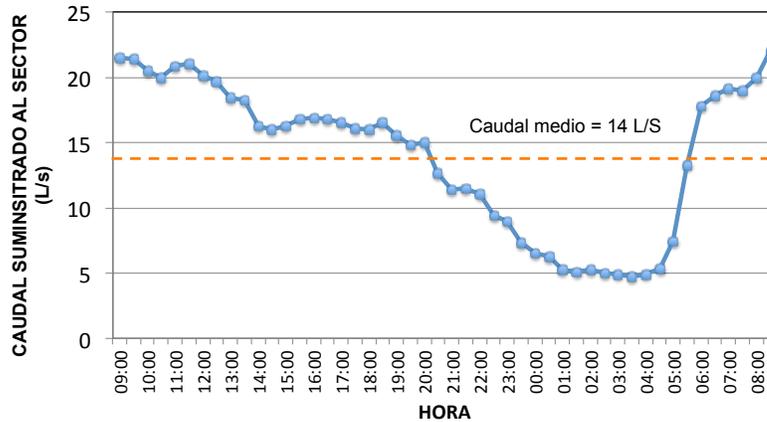


Figura 5-20. Medición continua de caudal antes de la prueba (sin cierre de conexiones domiciliarias) en el sector del sistema de abastecimiento de agua potable del ejemplo.

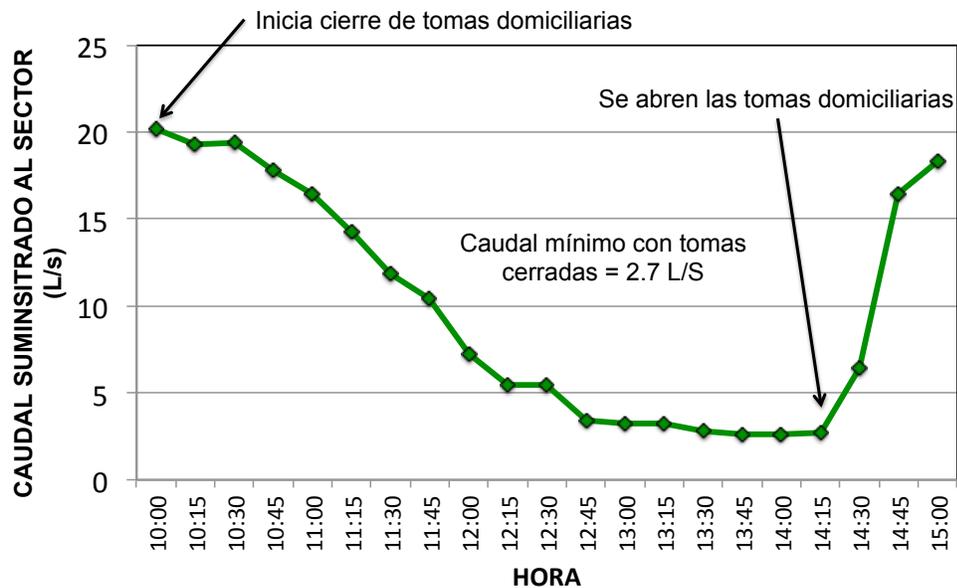


Figura 5-21. Medición continua de caudal (con el cierre de conexiones domiciliarias).

Entonces, con los datos de caudales observados antes y durante la prueba se calcula el indicador de fugas del sector, sustituyendo los valores en la ecuación 5.12.

$$I_{Fugas} = \frac{Q_{\text{mínimo sin consumo}}}{Q_{\text{medio}}} \times 100 = \frac{2.7}{14.0} \times 100 = 19.3 \%$$

Observa que el índice de fugas es menor al 20%, valor que el organismo operador de agua fijó como límite, por lo tanto el sector no tiene un nivel de fugas considerable

e) Caudal de suministro nocturno y presión hidráulica

Analizando cada uno de estos métodos de evaluación de eficiencia de sectores hidrométricos se observa lo siguiente: la auditoria de fugas de corta duración exige la detención del servicio de agua a los

usuarios, el índice de caudal mínimo nocturno resulta muy aproximado al no considerar las variaciones de presión en la red, y en el proceso de caudal mínimo sin consumo se necesita que todas las acometidas domiciliarias tengan instalada una llave de paso hacia el predio.

Desde hace algunos años, el grupo de trabajo de pérdidas de agua de la *International Water Association, IWA*, ha publicado una formulación sobre la variación del caudal de las fugas al cambiar la presión hidráulica de la red. Con base en esta formulación, se expone el siguiente método que se establece con la medición continua y simultánea de la presión hidráulica y del caudal suministrado a la red del sector hidrométrico durante un día (*Figura 5-22*).

El procedimiento consiste en identificar el caudal mínimo nocturno que se presenta y, a partir de éste, calcular en el resto del día la variación del caudal de fugas en función del cambio de la presión hidráulica en la red, tal como se muestra en la *Figura 5-23*.

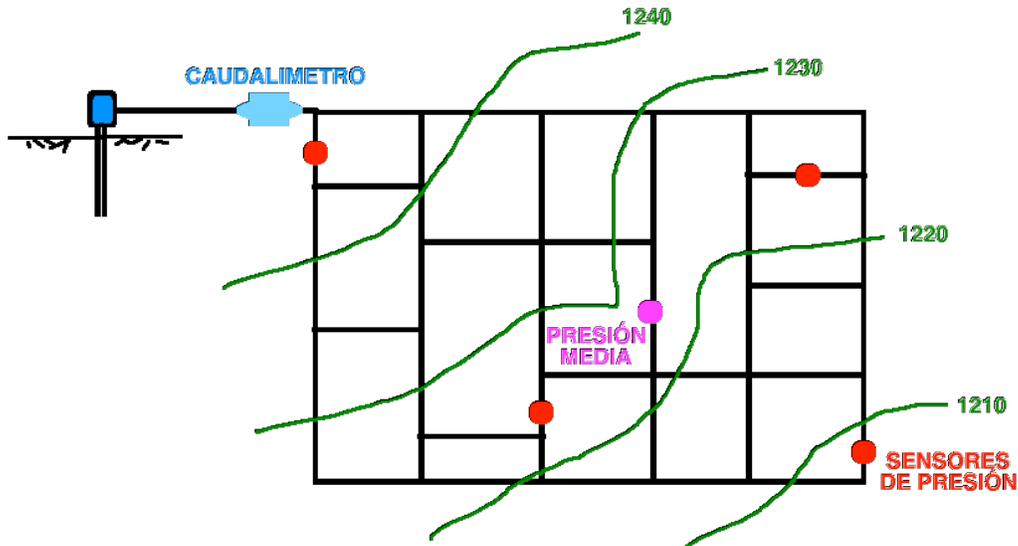


Figura 5-22. Esquema de la prueba de eficiencia en sector hidrométrico.

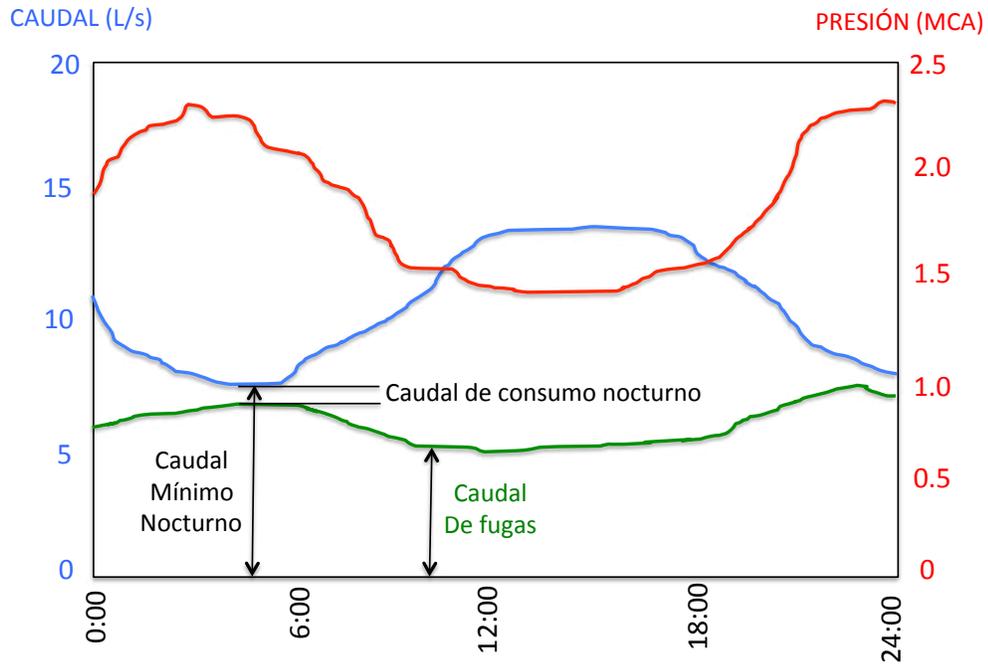


Figura 5-23. Curva de variación del caudal de fugas con la presión hidráulica en el sector hidrométrico.

En este método, las mediciones de caudal se realizan con los medidores fijos, o portátiles, instalados en la entrada de agua de cada sector; la presión hidráulica se registra con manómetros digitales o sensores remotos, respectivamente. El tiempo de prueba recomendado es de dos a tres días, con registros de datos a cada 15 minutos. Para calcular la variación del caudal de fugas a lo largo del día se utiliza la ecuación 5.13:

$$q_{fugas,i} = (q_{min} - q_{consumo \text{ en } q_{min}} - q_{exportado \text{ en } q_{min}}) \times \left[\frac{P_i}{P_{q_{min}}} \right]^{N1} \quad (5.13)$$

Donde, N1 es un exponente que depende del tipo de fugas predominante y del material del tubo (rígido o flexible); cuando no existen antecedentes sobre estos valores en la red en estudio, se considera un valor de N1 igual a uno.

f) Indicador de fugas de infraestructura

La evaluación de la eficiencia volumétrica o niveles de fugas en los sectores, determinada con las pruebas anteriores, refleja en buena medida la capacidad que tiene un sistema de abastecimiento para entregar el agua suministrada a la red hasta los usuarios y la magnitud del volumen de las fugas existentes. Sin embargo, el valor de los niveles de fugas no manifiesta el grado de deterioro de las tuberías, conexiones domiciliarias y otros elementos del sistema.

Por esta razón, es necesario aplicar indicadores que dependan de la longitud, la presión media, el tiempo de servicio y el número de tomas domiciliarias que tiene el sector de la red de distribución. La

International Water Association (IWA) recomienda la utilización del Índice de Fugas de infraestructura (IFI) que se calcula mediante la siguiente ecuación en el sector (Ref. 5.6):

$$IFE = \frac{VIF}{UMF} = \frac{\frac{V_{if}}{d \cdot N_t}}{(A \cdot L_r + B \cdot N_t + C \cdot L_t)p} = \frac{V_{if}}{d(A \cdot L_r + B \cdot N_t + C \cdot L_t)p} \quad (5.14)$$

Donde:

VIF = Indicador del volumen de fugas en el sector, en L/toma/día.

UMF = Umbral mínimo de fugas o inevitables, en L/toma/día.

V_{if} = Volumen anual de fugas en la red del sector, en L/año.

d = Tiempo de operación del sistema de abastecimiento, en días/año.

N_t = Número total de tomas domiciliarias registradas en el sector.

A , B y C = Parámetros que ponderan la variable que acompañan y que han sido determinadas con un análisis estadístico de 20 países (Ref. 5.6); $A=18$ L/km tubería/día/mca , $B= 0.8$ L/toma/día/mca, $C=25$ L/km tomas domiciliarias/día/mca.

L_r = Longitud total de las tuberías de la red del sector, en km.

L_t = Suma de las longitudes dentro de predios de todas las tomas domiciliarias, en km.

p = Carga de presión media en la red de distribución del sector, en mca.

Un valor del IFI igual a uno, deberá ser interpretado como el estado físico óptimo deseable en un sector de la red de abastecimiento. En la medida en que este valor se incrementa, se interpreta que la red se encuentra más deteriorada.

Ejemplo)

Calcular y comparar los dos valores del IFI, para un mismo sector de la red de agua potable, donde se ha logrado una reducción de fugas anual del 35.4% hasta el 20%. De los datos de las mediciones, antes y después de la reducción de fugas, se obtiene que el volumen anual de fugas en la red del sector es de 95'800,325 y 54'125,000 litros por año, respectivamente. Se tiene la información de que los siguientes parámetros se han mantenido constantes en la red del sector: carga de presión del agua = 7.3 mca; longitud de tuberías = 4,735 kilómetros; número de tomas domiciliarias = 829; y longitud promedio de tomas domiciliarias dentro del predio = 5 metros. También, el servicio ha sido continuo en ambas situaciones.

Solución)

La longitud total de las tomas domiciliarias dentro de predios es:

$$L_t = \frac{5 \times 829}{1000} = 4.145 \text{ km}$$

Sustituyendo los datos en la ecuación 5.13, antes y después de reducir las fugas en el sector, se calculan los IFI's respectivos, resultando:

Antes de reducir fugas:

$$IFI = \frac{VIF}{UMF} = \frac{\frac{95'800,325}{365 \times 829}}{\frac{(18 \times 4.735 + 0.8 \times 829 + 25 \times 4.145) \times 7.3}{829}} = \frac{316.6}{7.5} = 42.2$$

Después de reducir fugas:

$$IFI = \frac{VIF}{UMF} = \frac{\frac{54'125,000}{365 \times 829}}{\frac{(18 \times 4.735 + 0.8 \times 829 + 25 \times 4.145) \times 7.3}{829}} = \frac{178.9}{7.5} = 23.8$$

Al comparar los resultados, se observa que el IFI es mayor si las fugas ocurren con mayores porcentajes en el sector. El valor óptimo del IFI es igual a la unidad.

En conclusión, con la auditoria de fugas se estima el valor de volúmenes de fugas en un sector, pero no se establece el grado de deterioro que se presenta en la red. Tampoco, es válido comparar su valor entre ciudades o entre sectores, por las diferencias en su tamaño, infraestructura de abastecimiento y condiciones topográficas y climáticas locales. En cambio, el *IFI*, toma en cuenta varias características de la red o del sector y las prácticas operacionales propias, por lo que su valor sí se puede utilizar para hacer comparaciones entre sectores o ciudades; valores menores del *IFI* equivaldrán a sectores o redes menos deterioradas y con menores fugas.

Por último, es importante resaltar que el valor en porcentaje del índice de consumo mínimo nocturno *ICMN* y el valor del índice de fugas, *I_{fugas}*, no representan el porcentaje del volumen de fugas respecto al volumen suministrado, sino son indicadores de la existencia de muchas o pocas fugas respecto a un umbral preestablecido en el sector o distrito hidrométrico.

5.5 EVALUACIÓN DE EFICIENCIA DE FACTURACIÓN EN SECTORES

En un organismo operador de agua potable, un requisito para que la facturación del consumo de agua de los usuarios se realice con éxito, es asegurar el funcionamiento correcto de los equipos de medición y garantizar la confiabilidad del proceso de lectura de datos, procesamiento y emisión de boletas de cobro. Desde el punto de vista de una red con sectores, es conveniente vigilar que esto se cumpla, puesto que los valores de consumos de dicha facturación repercuten fuertemente en la confiabilidad de la auditoria de fugas y la dotación, y por ende en la evaluación de las eficiencias volumétrica e hidráulica de los sectores de la red de agua potable.

Para asegurar el funcionamiento correcto de los medidores domiciliarios, es necesario que se determinen y corrijan los errores de exactitud de los equipos, aplicando pruebas periódicas en un laboratorio o en campo (*inciso 2.5.2*). La corrección se realiza ya sea reemplazando el medidor por uno nuevo o bien reparando el existente. En cualquier caso, se tienen que cumplir las especificaciones de exactitud permisibles de la norma vigente.

Por su parte, la garantía de la facturación se logra si se identifican y corrigen los errores inherentes, mediante inspecciones y revisiones de los registros de lectura, procesamiento y emisión de boletas de

cobro. La implementación de procesos y equipos automáticos minimiza los errores de facturación, por lo que es importante que se implementen estas tecnologías en la corrección de dichos errores.

Ejemplo)

En la Figura 5-24 se muestran algunas de las tecnologías de radio frecuencia para lectura remota que se ofrecen en el mercado nacional.



Figura 5-24. Equipos comerciales de lectura remota y procesamiento de facturas de volumen en micromedidores de usuarios.

Fuentes: Badger Meter, catálogo de medidores y equipos de radiofrecuencia automático.

<http://www.badgermeter.com/>

<http://spanish.alibaba.com/product-gs/wireless-remote-control-water-meter-325476160.html>;

Además de la ausencia de errores, con el mejoramiento automático del ciclo de lectura de consumos hasta la emisión de la factura para el usuario, se obtienen los siguientes beneficios:

- Reducción del tiempo de lectura por medidor.
- Reducción del costo de lectura por medidor.
- Eliminación de errores humanos.
- Eliminación de fraude.
- Liberación de tiempo del personal (horas-hombre).
- Mejoramiento de las condiciones de trabajo del personal de lectura.

Asimismo, se atiende mejor a los usuarios del sistema de abastecimiento, logrando lo siguiente:

- Facturación precisa y a tiempo.
- Eliminación de facturaciones estimadas.
- Respeto a la privacidad del usuario.
- Disminución de las quejas de los usuarios.
- Elaboración de lecturas rápidas en caso de quejas por facturación.

- Seguimiento de perfiles de consumo, alerta sobre posibles fugas.

Un problema importante en los sistemas de agua potable son las conexiones no autorizadas por la empresa de agua, normalmente conocidas como fraudes y conexiones ilegales. Generalmente, se realizan con el fin de no pagar los altos consumos de agua. Debido a estas conexiones fraudulentas e ilegales, los ingresos por la venta de agua disminuyen. Como se vio en el *inciso 2.5.4*, el agua consumida por los usuarios de estas conexiones no autorizadas forma parte del agua que no se contabiliza en la facturación y, para efectos de la Auditoría de Agua, se le denomina “*Pérdidas aparentes*”.

Dentro del punto de vista técnico, las conexiones no autorizadas se pueden clasificar como se muestra en la *Figura 5-25 (Ref. 5.5)*.

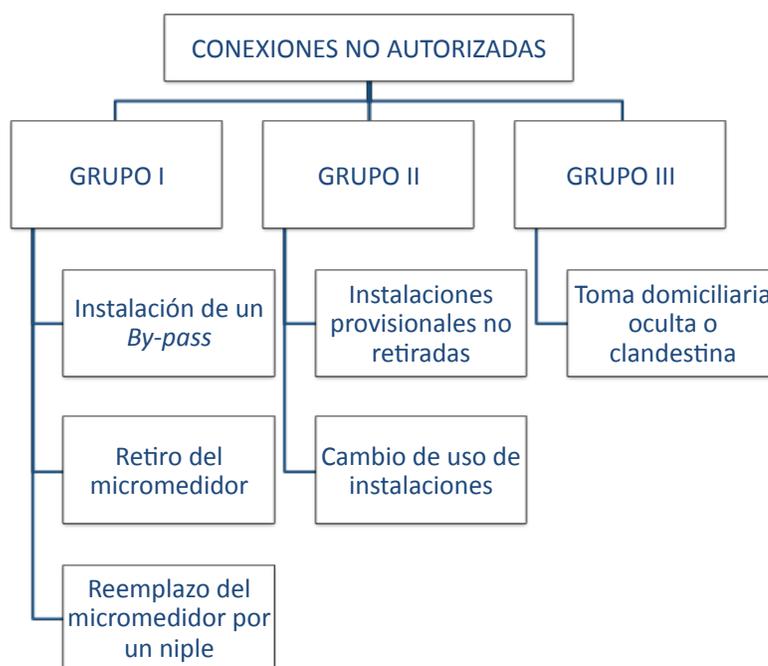


Figura 5-25. Clasificación de usos no autorizados en sistemas de abastecimiento de agua potable.
Conexión no autorizada del Grupo I

Conexión domiciliaria conectada a la red y registrada por la empresa de agua, pero que tiene una instalación fraudulenta, hecha por el usuario, que le permite el consumo de agua adicional a la que contabiliza su medidor.

Conexión no autorizada del Grupo II

Conexión domiciliaria que no está actualizada oficialmente, es decir, la que tiene un uso diferente al que se tiene registrado en el listado de contratos, o la que presenta anomalías en su contabilización.

Conexión no autorizada del Grupo III

Conexión domiciliaria que está conectada a la red de agua potable, pero que el organismo operador de agua no tiene registrado al usuario (uso totalmente clandestino u oculto). Este tipo es el más difícil de localizar, porque la conexión no existe en los contratos de la empresa ni en los listados de facturación, por lo que no es posible hacer ninguna referencia sobre ella. Muchas veces se instala atravesando lotes completos, o bien, con tuberías muy largas, lo que hace más complicada su localización.

Como se observa, son múltiples los fraudes que los usuarios pueden cometer en un sistema de distribución de agua potable, varios de ellos difíciles de controlar o detectar. Al respecto, no existen métodos convencionales para localizar los usos fraudulentos, por lo que es necesario realizar prácticas de campo y análisis estadísticos, aplicando las técnicas y los equipos disponibles, tales como detectores electrónicos de tuberías y fugas, micromedidores, manómetros, visualización sistemática, métodos de muestreo, etcétera.

Antes de comenzar con el programa de reducción y control de pérdidas aparentes en los sectores de la red de distribución de agua potable, es conveniente realizar una evaluación de la eficiencia de facturación que presenta cada uno, con el fin de identificar el potencial de irregularidades, los costos que implica y los beneficios esperados.

La eficiencia de facturación, $\eta_{facturación}$, es la relación del volumen total facturado por el organismo operador del sistema de agua potable, entre el volumen consumido por los usuarios (Ref. 5.3); se calcula con la ecuación 5.15.

$$\eta_{facturación} = \frac{V_{facturado}}{V_{consumo}} \times 100 \quad (5.15)$$

Donde el parámetro $V_{facturado}$ es el volumen total reportado en las facturas de consumo de agua de los usuarios, en metros cúbicos; la variable $V_{consumo}$ es el volumen total consumido por los usuarios, en metros cúbicos.

Ejemplo)

El área comercial de un organismo operador de agua potable ha reportado que en un sector de la red facturó a los usuarios un volumen anual total de 2'400,390 metros cúbicos. Derivado de un análisis se detectaron los siguientes volúmenes anuales por errores de facturación: a) Error en volumen por inexactitud de micromedidores = -145,000 m³; b) Error en volumen por mala lectura de micromedidores = + 45,900 m³; c) Error en volumen por procesamiento de datos = + 110,115 m³; d) volumen identificado por usos no autorizados = -267,500 m³. Determinar la eficiencia de facturación de este período de consumo mensual.

Solución)

El volumen de consumo de los usuarios, corregido por los errores identificados es (error negativo se suma y viceversa):

$$V_{consumo} = 2'400,390 + 145,000 - 45,900 - 110,115 + 267,500 = 2'656,875 \text{ m}^3$$

Entonces, la eficiencia de facturación se calcula sustituyendo los datos y este resultado en la ecuación 5.14, esto es:

$$\eta_{facturación} = \frac{V_{facturado}}{V_{consumo}} \times 100 = \frac{2'400,390}{2'656,875} \times 100 = 90.35 \%$$

Es importante mencionar que el porcentaje de la eficiencia comercial, como se muestra en el ejemplo, no descubre efectivamente el detalle de las fallas en la facturación, puesto que los volúmenes de agua debidos a errores de exactitud de micromedidores, malas lecturas, sub o sobre estimaciones de cuotas fijas y procesamiento de datos, se compensan aritméticamente. Por lo tanto, siempre será necesario realizar una auditoría de agua o balance hídrico, aplicado por sectores, para disponer de esta información cuando se programen acciones de incremento de sus eficiencias.

Como procedimiento alternativo a la auditoría de agua, para obtener mayor claridad del origen de las pérdidas aparentes en sectores de la red, se recomienda el método presentado en la *Figura 5-26 (Ref. 5.7)*:

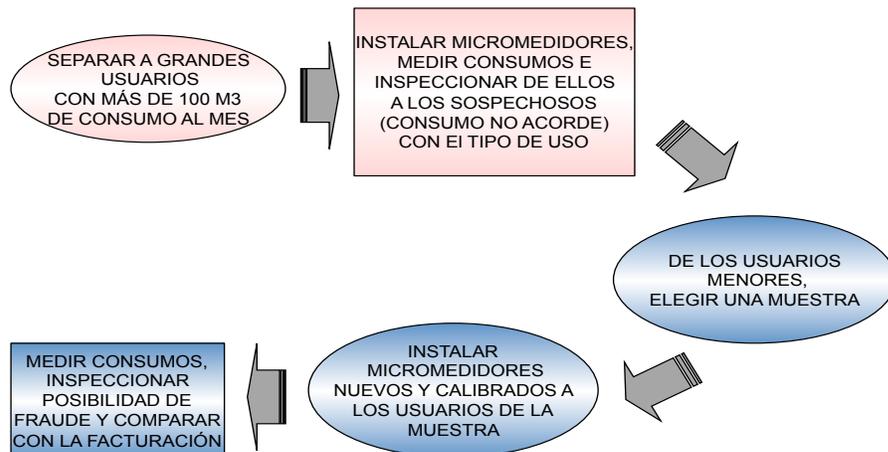


Figura 5-26. Procedimiento para identificar las pérdidas aparentes en sectores hidrométricos de la red de agua potable.

Para calcular el tamaño de la muestra, $n_{consumos}$, utiliza la ecuación siguiente:

$$n_{consumos} = \frac{Z_c^2}{d^2} \sigma^2 \quad (5.16)$$

Donde σ será la desviación estándar del consumo mensual promedio de usuarios, que puede obtenerse con los datos de la facturación mensual. La variable d será el error en la estimación de parámetro a evaluar. En este caso, el consumo unitario dado en m^3/mes . El valor de Z_c es la abscisa de la curva de probabilidad normal tipificada, correspondiente a un determinado nivel de confianza (ver inciso 2.5.3.b).

Ejemplo)

Si el consumo mensual medio es de $20 m^3/mes$ y se tiene una desviación estándar de $12 m^3/mes$, el tamaño de la muestra con un error en la estimación de $1 m^3/mes$ y un nivel de confianza del 95%, será:

$$n_{\text{consumos}} = \frac{1.96^2}{1^2} 12^2 = 553 \text{ usuarios}$$

Los usuarios de la muestra se escogen del padrón registrado o con coordenadas geográficas seleccionadas al azar. En el desarrollo de la prueba de campo, se registran los consumos con personal independiente o distinto al que habitualmente toma las lecturas, para identificar en el estudio los posibles vicios del sistema en el proceso de lectura.

La inspección y censo de los usuarios de consumos superiores a 100 m³/mes, que resulten sospechosos, y los de la muestra (consumidores pequeños), se realiza en campo de la siguiente manera:

1) Se localiza el predio o el inmueble, de acuerdo con lo que está anotado en el listado de usuarios del organismo operador del sistema de agua potable. Cuando se encuentren más de dos tomas domiciliarias, se reportan tales irregularidades.

2) Se procede a revisar el tipo de uso registrado, por decir, si se trata de un uso industrial debe comprobarse que efectivamente en el listado aparece de esa manera; se anota en la bitácora el resultado.

3) Se revisa minuciosamente toda la propiedad y la toma domiciliaria de agua, para identificar posibles fraudes o clandestinaje y se reporta el resultado.

4) En caso de no encontrar irregularidades, se censa la propiedad, para cuantificar el número de muebles sanitarios, volúmenes de almacenamientos internos, área de jardín, etc. Con estos datos se estima el consumo diario y mensual y se compara con el consumo registrado en la facturación mensual del área comercial del organismo operador de agua. Si no hay correspondencia aproximada, se procede a revisar el área con equipos electro-acústicos de detectores de fugas o de tuberías enterradas, para buscar una posible toma domiciliaria oculta; esta actividad es más eficaz por la noche, cuando no hay mucho ruido ambiental.

5) Todos los datos, anotaciones, observaciones se reportan en un formato preparado de antemano, que después será procesado para establecer conclusiones de todas las inspecciones.

Con toda la información obtenida en campo de este modo, se pueden estimar muchos elementos relevantes, como los siguientes:

- Con la comparación de la clasificación del tipo de usuario proveniente de la muestra, con la del listado del organismo operador del sistema de agua, se valora si hay un problema importante de clasificación de usuarios.
- Al multiplicar los datos del número de habitantes por toma domiciliaria doméstica obtenidos en la muestra, por el índice de hacinamiento del censo oficial de población, y comparar el resultado con la población del censo y número de viviendas con agua potable, se evalúa la magnitud del problema de tomas domiciliarias no registradas.
- Con las direcciones listadas de los usuarios elegidos en la muestra y no localizadas durante la revisión de campo, se conoce el orden de contratos inexistentes (que podrían ser clandestinos) y se detecta la ausencia de mecanismos de bajas en el listado de usuarios y, por ende, del sistema comercial.
- Al revisar el consumo unitario por persona en la muestra, se identifica si los consumos excesivamente bajos están justificados.

- Al multiplicar los datos del consumo unitario doméstico por la población con servicio de agua, según el censo oficial, y comparar contra el consumo facturado, se evalúa si el consumo clandestino es un problema de consideración.
- Al comparar la función de distribución frecuencia de consumos de la muestra de los usuarios que cuentan con micromedidor, contra la de la facturación del listado de los usuarios con consumo medido, se valora la calidad del proceso de registro de lecturas domiciliarias.
- Con pruebas de exactitud hechas a los medidores retirados, se conoce el problema de sub o sobre-medición por mal funcionamiento de los medidores.
- Finalmente, con la revisión minuciosa de los predios se determina la existencia de fraudes, tales como by-pass, medidores invertidos, dobles acometidas, etc.

Si con los resultados de la auditoria de agua o del método descrito antes, se deduce que existen fuertes anomalías en la facturación de los consumos, o que hay sospecha de un grupo importante de fraudes, entonces se implementa un programa de regularización de pérdidas aparentes. Esta actividad puede resultar lenta y costosa, cuando se pretende realizarla en todo el sistema de abastecimiento de agua potable, por esta razón es conveniente abordar el problema por sectores, priorizando los trabajos en aquellas zonas donde exista mayor evidencia de las pérdidas aparentes.

Ejemplo)

En un estudio de sector que tiene instaladas 4,520 tomas domiciliarias en su red de agua potable, se seleccionó una muestra aleatoria de 300 usuarios con consumos menores a 100 m³/mes. De las inspecciones y pruebas de campo, se encontraron los siguientes resultados:

- *Existen 235 micromedidores, funcionan 153, están parados 82.*
- *Volumen de consumo medio registrado en la muestra igual a 21 m³/mes.*
- *Volumen de consumo medio facturados en la muestra por el área comercial igual a 16 m³/mes.*
- *Se comprobó que 116 micromedidores funcionan dentro de un rango aceptable de exactitud (error dentro del +/- 2% del caudal nominal).*
- *En estos 116 micromedidores, el 45% de ellos tienen más de cinco reportes repetidos de consumo mensual.*
- *En el 29% de los 82 micromedidores que no funcionan, en cada uno de ellos hay reportes mensuales de consumo diferentes en la facturación.*
- *Se encontraron 17 tomas domiciliarias de casas deshabitadas, predios baldíos y tomas suspendidas.*
- *Se encontraron 5 usuarios registrados en el padrón, cuyas direcciones no se localizaron.*

Se desea interpretar los resultados del muestreo, para determinar acciones de regularización en la facturación del sector.

Solución)

En primer lugar, se estima la eficiencia de la facturación, dividiendo el consumo medido con la muestra entre el volumen facturado, correspondiente a la misma muestra:

$$\eta_{\text{facturacion}} = \frac{V_{\text{facturado}}}{V_{\text{consumo}}} \times 100 \approx \frac{\text{Consumo}_{\text{facturado en muestra}}}{\text{Consumo}_{\text{medido en muestra}}} \times 100 = \frac{16}{21} = 76.2 \%$$

El resto de los resultados se interpretan como sigue (todos los porcentajes están referidos al total de tomas domiciliarias):

- *Existen micromedidores en el 78.3% de las tomas domiciliarias; funcionan el 51%, están parados el 27.3%.*
- *Se estima que el 38.6 % de las tomas tienen micromedidores que funcionan dentro de un rango aceptable de exactitud (error dentro del +/- 2% del caudal nominal).*
- *Del 17.4 % de las tomas tienen más de cinco reportes repetidos de consumo mensual, lo que infiere que el personal del organismo no toma lecturas en estos aparatos.*
- *En el 7.9 % de las tomas domiciliarias que tienen micromedidor parado, hay reportes mensuales de consumo diferentes en la facturación en cada uno de ellos; por lo tanto, el personal está inventando los datos.*
- *El 5.7 % de tomas domiciliarias no existen, ya que se trata de casas deshabitadas, predios baldíos y tomas suspendidas.*
- *El 1.7 % de los usuarios registrados en el padrón no existen, ya que sus direcciones no se localizaron.*

Por último, es importante anotar que en cualquier sistema de distribución de agua potable que se encuentre en un estado de sectorización de su red, o que se pretenda desarrollar bajo este esquema de operación, es necesario modificar la relación de cuentas de los usuarios y toda la información de la facturación del sistema comercial para que corresponda geográficamente y en forma exacta con cada sector.

La zonificación de contratos de usuarios del área comercial con los sectores facilita enormemente las labores de evaluación y monitoreo continuo de los sectores; por eso se considera un elemento clave del proyecto de sectorización.

5.6 MANTENIMIENTO CONTINUO DE SECTORES

Toda vez que se ha implementado un sector en la red del sistema de agua potable, surge la necesidad de establecer un programa de mantenimiento continuo en él, con el fin de que se conserve su estado físico y se tenga actualizada toda la información técnica de su diseño, construcción y operación.

Los trabajos de mantenimiento físico de los sectores son preventivos y correctivos; se dividen en: a) mantenimiento y reparación de válvulas, b) Mantenimiento y reparación de medidores.

Existe otro trabajo de mantenimiento relacionado con los sectores de la red, que no es físico, pero que es relevante para el desempeño del personal en sus labores de operación y reparación. Este trabajo tiene que ver con la actualización y almacenamiento de datos e información. Conforme se avanza en el proceso de incremento de eficiencia hidráulica y volumétrica del sector, algunos elementos de la red, como válvulas, tuberías, equipos e instrumentos, van cambiando físicamente. También se van acumulando datos de todo tipo, estadísticos, de medición y modelación hidráulica. Por lo tanto, se vuelve necesario mantener un programa de actualización de toda esta información y datos.

En este capítulo se exponen los procedimientos y cuidados para establecer un mantenimiento continuo en los sectores de la red de distribución de agua potable.

5.6.1 Mantenimiento de válvulas

A lo largo de su vida útil, las válvulas instaladas en los sectores de la red de agua potable sufren un deterioro natural, propiciado por las características del agua que pasa por ellas y las condiciones de operación de cada sistema. Por esto, se lleva a cabo un estricto programa de mantenimiento continuo dirigido a estos accesorios. Las válvulas manuales requieren limpieza de sus partes internas, o su reemplazo, cuando están muy desgastadas.

En particular, para las válvulas automáticas instaladas en una red de agua, el programa de mantenimiento consiste básicamente de dos actividades:

- a. Limpieza de las partes internas y accesorios.
- b. Comprobación del funcionamiento.

Para realizar la limpieza de las partes internas de las válvulas automáticas, es necesario desmontarlas y tener especial cuidado para no perder sus accesorios al momento de desarmarlas. También, es necesario respetar el orden de instalación de los accesorios de las válvulas durante el armado. Por lo anterior, se recomienda que tenga presente el manual de la válvula o que se solicite ayuda a un profesional en la materia.

En la *Figura 5-27* se muestran imágenes de la inspección, desarme y limpieza de una válvula automática reductora de presión, donde se encontró un recipiente de plástico y una roca dentro de ella. Y en la *Figura 5-28* se muestra la reparación de una válvula automática reductora de presión expuesta a vandalismo y falta de mantenimiento.

Para comprobar y ajustar el correcto funcionamiento de las válvulas automáticas (limitadoras de caudal, sostenedoras y reductoras de presión), es necesario comparar y calibrar los datos de diseño (presión y caudal) con los de mediciones de campo. Los datos de diseño de las válvulas se consultan directamente en el modelo de simulación o en los planos ejecutivos del proyecto de sectorización.

En las válvulas reductoras y sostenedoras de presión, la calibración se hace con una inspección visual, comparando y ajustando los datos de presión de los manómetros instalados en las válvulas con los valores de diseño. La calibración de las válvulas reductoras y sostenedoras consiste en ajustar nuevamente los valores de presión en el manómetro respectivo, moviendo el tornillo del piloto que tiene la válvula para tal propósito.



Figura 5-27. Inspección, desarme y limpieza de una válvula automática reductora de presión debida a una obstrucción.



Figura 5-28. Inspección, desarme y limpieza de una válvula automática reductora de presión expuesta a vandalismo y falta de mantenimiento.

En el caso de las limitadoras de caudal, se instala un medidor de flujo portátil sobre la tubería donde está instalada la válvula y se ajustan los registros de caudal y presión de trabajo, con los de diseño. La

calibración de las limitadoras de caudal se realiza ajustando el tornillo del piloto hasta que por la válvula fluya el caudal designado en el diseño.

La calibración de las válvulas es una tarea muy sencilla. Lo único que se cuida es que los manómetros y el medidor portátil de caudal estén certificados y en magnifico estado físico, así como realizar el ajuste de acuerdo con los parámetros establecidos en el diseño. En estas actividades es muy importante que se elabore una bitácora de mantenimiento, donde se registren los valores obtenidos de la campaña de revisión de válvulas, o sea: ubicación, tipo de válvula, diámetro, marca, modelo, datos de diseño, datos de operación, clave del cruce, ajustes realizados, fecha, personal participante, etcétera.

En los sistemas de agua potable de gran extensión, resulta difícil hacer la revisión de todas las cajas con válvulas de seccionamiento; sin embargo, se recomienda verificar con más frecuencia aquellas que tengan mayor relevancia en la operación de los sectores de la red, como por ejemplo: válvulas de interconexión entre sectores, válvulas utilizadas en desfogues y válvulas instaladas en líneas de conducción.

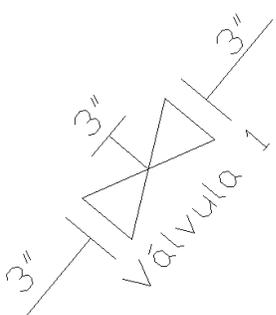
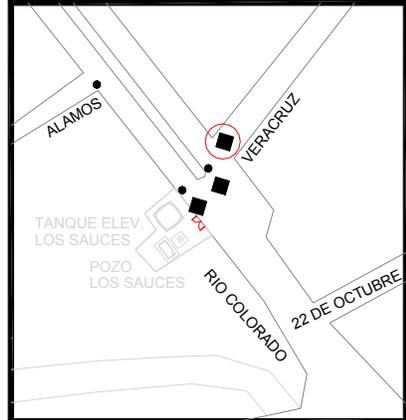
En la *Figura 5-29* se muestran imágenes donde se aprecia el trabajo para sustituir una válvula de seccionamiento utilizada para aislar un sector con la compuerta caída y en la otra, se aprecia el grado de deterioro que puede presentar una válvula automática sin mantenimiento.



Figura 5-29. Válvulas de compuerta y reductora de presión, deterioradas por la falta de mantenimiento.

En muchos sistemas de agua, es muy común encontrar cajas azolvadas con tierra, basura o inundadas. Esto tiene un impacto negativo en el sistema, pues al estar azolvadas o inundadas se corre el riesgo de contaminación del agua que es transportada por las tuberías. Por esto, se realizan trabajos continuos de revisión y limpieza en todas las cajas de válvulas en los sectores de la red de distribución de agua.

En la *Figura 5-30* se muestra una ficha técnica tipo para reportar el trabajo de limpieza de cajas de válvulas en los sectores de la red de agua potable.

Calles:	RIO COLORADO Y VERACRUZ		
Colonia:	SAN ISIDRO		
No. de cruceo:	541	No. de caja:	90
No. de tapas:	1	No. de válvulas:	1
Referencias:			
 <p style="text-align: center;">Croquis de Localización</p>			
La caja se encontraba azolvada por:	TIERRA e INUNDADA		

CARACTERÍSTICAS DE LA VÁLVULA

Diámetro (plg):	1 DE 3"
Tipo de vástago:	DADO
Comentarios:	VALVULA 1

Observaciones: 1 VALVULA DE COMPUERTA DE 3" (SIN VOLANTE), TUBERIAS Y JUNTAS DE PVC



Fotografía de la válvula antes de desazolvar



Fotografía de la válvula después de desazolvar

Fecha: 14 de marzo de 2011

Responsable: Juan Hernández L.

Figura 5-30. Ficha técnica tipo para reporte de limpieza de cajas de válvulas azolvadas, inundadas o con basura.

Por último, se recomienda que el programa de mantenimiento de las válvulas automáticas se realice al menos tres veces al año. Para las válvulas de seccionamiento que conforman la red de distribución, se recomienda que el mantenimiento y limpieza de cajas se haga, al menos, una vez al año.

5.6.2 Mantenimiento de medidores

Al igual que las válvulas, los medidores de flujo de un sistema de agua potable también sufren deterioro con el paso del tiempo, por las características fisicoquímicas del fluido que pasa por ellos, las condiciones de operación y por las inclemencias del tiempo, ya que muchos de estos instrumentos se encuentran instalados a la intemperie. Además, pueden desajustarse y registrar los volúmenes de agua de forma equivocada o inexacta.

Ejemplo)

En la Figura 5-31 se presentan imágenes de dos medidores con un deterioro muy avanzado. Izquierda. Se muestra un medidor instalado sobre el piso de una caja de válvula, en la cual se observa un poco de azolve a pesar de estar tapada. Derecha: Un medidor instalado sobre el piso sin protección contra la intemperie, robo y sin tapa en la carátula.



Figura 5.31.a. Medidor con azolve.



Figura 5.31.b. Medidor sin caja, protección ni carátula.

Figura 5-31. Ejemplo de medidores con alto grado de deterioro por la falta de mantenimiento.

Por lo anterior, es importante que en los medidores también se realice un mantenimiento continuo, bajo un programa que cubra el total de los aparatos del sistema de agua potable.

Para los medidores de flujo de un sistema de agua, el programa de mantenimiento consiste básicamente de dos actividades:

- Limpieza y revisión de partes internas.
- Verificación de exactitud en la medición.

Estas dos acciones, permitirán que el organismo operador de agua disponga de un sistema confiable de medición, con los medidores dentro de los rangos de exactitud especificados por la norma.

La elaboración del programa de mantenimiento se inicia con elaboración de una lista de los medidores instalados en el sistema de abastecimiento y la recopilación de los datos existentes en el organismo operador de agua. La relación de medidores contiene la siguiente información:

- a) Características técnicas del medidor: marca, tipo, diámetro, capacidad.
- b) Características físicas del sitio de instalación: diámetro, presiones, caudales.
- c) Croquis de localización y detalles de instalación.

Para hacer el mantenimiento es necesario desmontar el medidor de la tubería donde se encuentre instalado y, posteriormente, hacer una limpieza total, tomando en cuenta las recomendaciones del fabricante. En caso de que se deba desarmar el medidor para limpiarlo, es necesario respetar el orden de instalación de las piezas en el momento de armarlo nuevamente, para que no ocurran problemas por falta de piezas. Durante la revisión, se recomienda hacer un reconocimiento de todas sus partes e identificar las piezas dañadas o que presenten desgaste, para sustituirlas por piezas nuevas. Un problema que se presenta comúnmente es que algunas piezas dañadas o desgastadas no se encuentran en el mercado. Si esto sucede, no se debe improvisar instalando piezas similares, mejor será reemplazar completamente el medidor.

Ejemplo)

En la Figura 5-32 se muestra un ejemplo de un medidor sustituido como parte del mantenimiento de un tren de descarga del pozo en un sector de un sistema de abastecimiento de agua potable.

Cada vez que se da mantenimiento, repara o sustituye un medidor, se realiza inmediatamente la verificación de su exactitud. Se recomienda utilizar el método de comparación de registros con un medidor portátil calibrado, siendo este el más rápido, práctico y económico (ver inciso 2.5.1).

En cuanto a los tiempos para las actividades del mantenimiento, se sugiere que, al menos, una vez al año se retire el medidor para su limpieza y revisión de partes internas, y cada seis meses, se realicen las pruebas de exactitud. Siempre se deberá elaborar una bitácora para conformar la estadística del mantenimiento de estos equipos.

Por último, se debe tener en mente, que al realizar el mantenimiento de estos instrumentos, en algunos casos se tendrá que suspender el suministro de agua a los usuarios. Por lo anterior, es muy importante programar bien esta actividad y tomar precauciones, con el fin de afectar lo menos posible el servicio de agua en la red.



Figura 5-32. Ejemplo de reemplazo de medidor dentro del mantenimiento a un tren de descarga de pozo en un sector de la red.

5.6.3 Actualización de datos e información de la red en planos y modelo de simulación hidráulica

En la etapa de planeación y diseño de los sectores del proyecto de sectorización de la red de agua potable, no es posible predecir todos los cambios futuros que existirán en la red. La dinámica de la operación y mantenimiento del sistema de abastecimiento de agua potable es tal que, continuamente, se presentan todo tipo de cambios físicos y operacionales. Bajo estas situaciones, es necesario actualizar y modificar constantemente los parámetros hidráulicos, el diseño, los planos y el modelo de simulación de los sectores originales.

Ejemplo)

En la Figura 5-33 se muestra un sector con su diseño original, donde no existía red, ni se conocía el tipo de desarrollo futuro de dos zonas dentro de él. También, se muestra la actualización del plano del sector, una vez que se construyeron nuevos fraccionamientos en dichas zonas.

Cuando se actualizan los planos de los sectores, por algún cambio ocurrido en la configuración de la red de distribución, se realiza de inmediato la actualización correspondiente en el modelo de simulación hidráulica y se comprueba si el funcionamiento hidráulico del sector es adecuado.



Figura 5-33. Ejemplo de actualización de plano, por la construcción de nuevos fraccionamientos en el sector de diseño original.

Ejemplo)

En la Figura 5-34 se muestran los dos modelos de simulación hidráulica del sector de la Figura 5-33, donde los resultados indican que las presiones y caudales se encuentran dentro de los rangos permisibles asignados en el diseño original del sector.

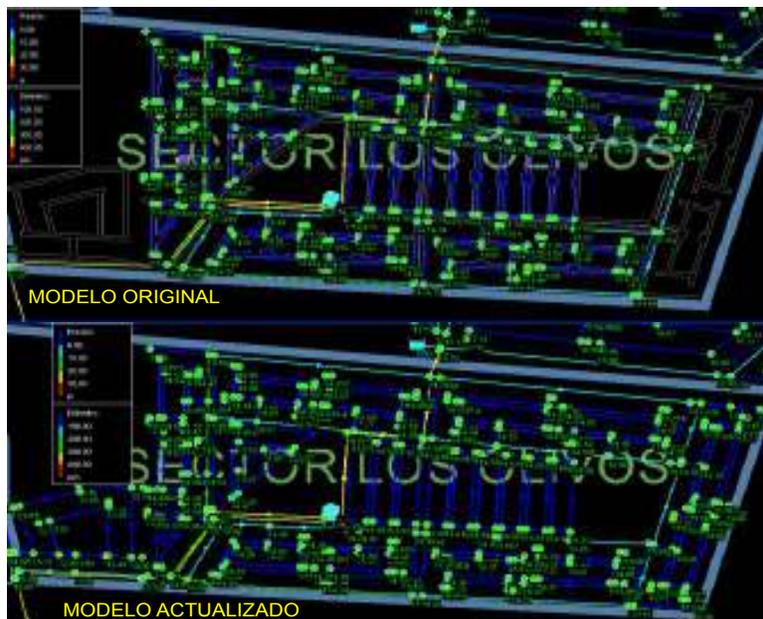


Figura 5-34. Modelos de simulación hidráulica del sector del ejemplo, cumpliendo rangos de presión y caudal del diseño original.

El organismo operador de agua potable debe establecer su proceso para la actualización continua de los planos de sectores y modelos de simulación, con el fin de tener efectividad y coordinación entre las diferentes áreas que intervienen en la planeación, construcción, operación y mantenimiento. En la *Figura 5-35* se presenta el proceso recomendado para retroalimentar y actualizar continuamente la información de los planos y modelo de simulación en los sectores de la red de agua potable, durante su construcción, operación y mantenimiento futuro.

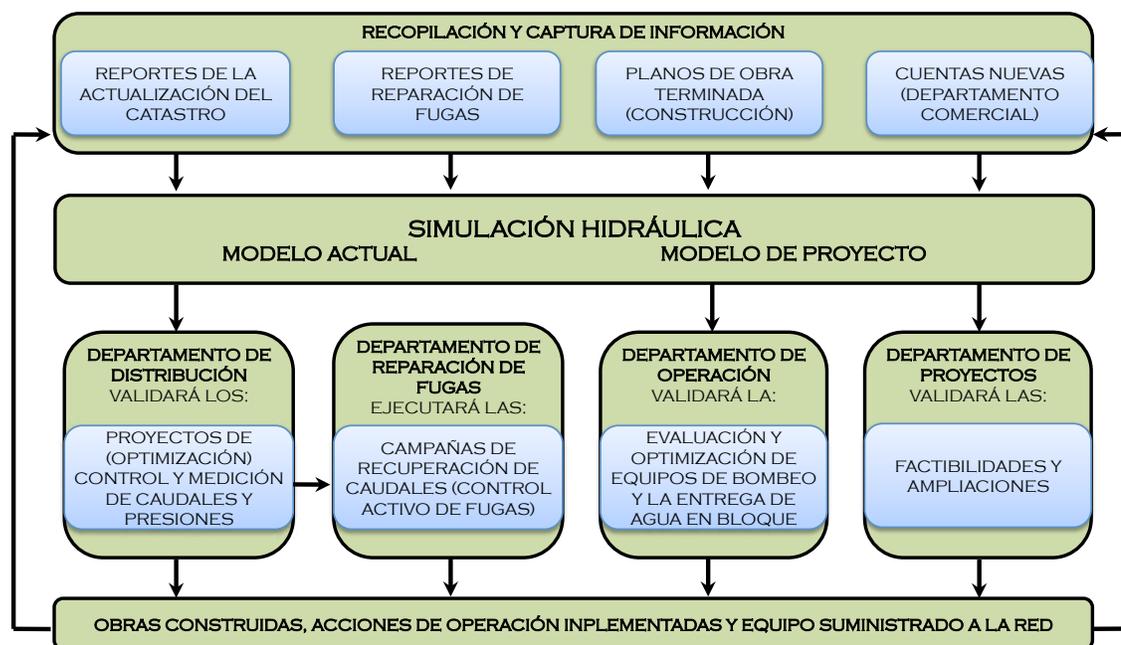


Figura 5-35. Proceso para actualizar continuamente el plano y modelo de simulación hidráulica de sectores, ante los cambios de infraestructura, operación y mantenimiento.

Las siguientes recomendaciones son útiles durante el proceso de actualización de planos y modelo de simulación hidráulica de sectores, ante los constantes cambios de infraestructura, operación y mantenimiento:

- El modelo de simulación hidráulica actual y de proyecto de la red de agua potable debe ser administrado por una sola persona o área responsable.
- Se recomienda realizar la recopilación de información en períodos semanales (lunes a viernes).
- El modelo debe ser actualizado todos los lunes con la información recopilada en los periodos semanales anteriores.
- Una copia del modelo actualizado (operación actual) puede ser entregada a los departamentos de proyectos, operación y distribución para apoyar sus propias actividades.
- La versión original será el único que se actualizará semanalmente y estará administrado por el área responsable, las otras versiones copia, serán reemplazadas semanalmente, por lo que no requerirán trabajos de actualización.
- Las propuestas y modificaciones a la red no deben ser incluidas en el modelo de simulación actual hasta que sean ejecutadas en campo.
- Todas las propuestas y modificaciones a la red actual deberán ser evaluadas y aprobadas por el personal de modelación y por los departamentos de operación, distribución y proyectos dependiendo de la naturaleza de las propuestas.

Bibliografía

- [5.1] AWWA, 1986 “Water distribution, principles and practices of wáter supply operations”, American Water Works Association, Vol. 3, USA.
- [5.2] Dangerfield B., 1983, “Water Supply an Sanitation in Developing Countries”, Intitution of Water Engineers and Scientists, London.
- [5.3] Richard Ainsworth, 2001, “Safe Pipe Water” editado por International Water Association, IWA y World Health Organitation, WHO.

Referencias

- [5.1] Olivares R., 2011 “El servicio civil de carrera y certificación de competencias laborales, El caso del subsector de agua potable y saneamiento” ANEAS, México.
- [5.2] Ochoa A.L. y Pedraza M. A., 2010, Manual de incremento de eficiencia física, hidráulica y electromecánica en sistemas de agua potable, editado por CONAGUA, México.
- [5.3] Ochoa A. L., 2005, Planeación de acciones de incremento y control de eficiencia en sistemas de agua potable, CONAGUA, México, D.F.
- [5.4] Hueb J. A. (1985); Control de fugas en los sistemas de distribución de agua potable, Manual DTIA, No. C-7; Lima Perú, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente-CEPIS.
- [5.5] Ochoa L., V. Bourguett, 1998, Reducción Integral de Pérdidas de Agua Potable, Editado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, Jiutepec, Morelos, México.
- [5.6] Lambert, A. O., 2002, International Report: Water losses management and technique. Water Science and Technology: Water Supply. pp 1-20.
- [5.7] Capella V. A., 2003, Metodología para realizar diagnósticos de eficiencia en sistemas de agua potable, notas no publicadas, México D.F. Consultor.

Proyectos de referencia

- [5.1] Proyecto de Sectorización 3ª etapa Zona Conurbada del municipio de Toluca Estado de México, AST, Mayo de 2008.
- [5.2] “Eficiencia electromecánica, física y de la operación hidráulica de la red agua potable de Parral, Chihuahua” Informe JMAS-Watergy Jun. 2007, México.
- [5.3] “Proyecto de sectorización de la red de distribución de agua potable (tercera etapa)”, Informe, SAPAC-ESPERTO, oct. 2010, México.
- [5.4] “Proyecto de microsectores piloto para la obtención de parámetros del control de pérdidas de agua de la zona A en la ciudad de méxico” Informe, Proactiva Medio Ambiente-SAPSA, Abril 2011, México.
- [5.5] “Proyecto de puesta en operación del sector SH-3 de Monclova, Coah.”, Informe, SIMAS-WATERGY, Junio 2008, México.
- [5.6] “Proyecto supervisión del aseguramiento de la calidad del programa de mejoramiento de eficiencia de células de la ciudad de Santiago de Querétaro” Informe, CEA-IMTA, Mzo. 2003, México.
- [5.7] “Plan de la puesta en marcha de sectores preliminar” Informe WATERGY-JCAS. Mayo 2008, México.
- [5.8] “Modelación Hidráulica Del Sistema De Agua Potable De Ciudad Valles, S. L. P.” Modelos Actual y de Proyecto, DAPA-SHIPSA, Dic. 2010, México.

Ligas internet

- [5.1] http://1.bp.blogspot.com/_PTq4Y1ekjmc/
- [5.2] <http://www.google.com.mx/imgres?imgurl=http://media.elsiglodetorreon.com.mx/i>
- [5.3] <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07>
- [5.4] <http://www.sinia.net.ni/webayc2/documentos>
- [5.5] <http://atco.org.mx/formatos/mantenimiento.pdf>
- [5.6] <http://www.regioncusco.gob.pe/dirvivienda/attach/Modulo%2004-2009.pdf>
- [5.7] http://2.bp.blogspot.com/_BjhFmxUJbOM/TO6l3etL29I
- [5.8] <http://safe-img04.olx.com.mx/ui/6>
- [5.9] http://gazpachero.blogspot.com/2010_04_01_archive.htm
- [5.10] http://www.palintest.es/palintest/Upload/Images/efluente_1.jpg
- [5.11] <http://www.r-chemical.com/blog/wp-content/uploads/2011/10/DPD71.bmp>
- [5.12] http://www.vicoinstalaciones.es/images/fugas_003.jpg
- [5.13] <http://www.appareil.cl/img/Productos>
- [5.14] <http://spanish.alibaba.com/product-gs/wireless-remote-control-water-meter-325476160.html>

EPÍLOGO

La sectorización de redes de distribución de agua potable es el resultado de varios años de desarrollo, desde la propuesta original de distritos hidrométricos para la gestión de fugas en el año 1980, hasta la época presente como parte esencial de la planeación, diseño, construcción y operación eficiente de los sistemas de abastecimiento de agua urbanos.

Al igual que varios organismos operadores de sistemas de agua potable en México, muchas empresas de agua en el mundo reportan estar trabajando en el control de fugas de agua desde finales de la década de los 80's utilizando los distritos hidrométricos como medida de gestión de las pérdidas de agua. Sin embargo, es hasta después del año 2000, que esta técnica se va transformando en el concepto de sectores hidrométricos, con mejores resultados, notables y exitosos, los cuales pueden ser adjudicados principalmente a tres factores:

- 1) A las experiencias (buenas y negativas) que se tuvieron durante los primeros esfuerzos realizados para implementar los distritos hidrométricos en las redes de distribución de agua potable.
- 2) A las modernas herramientas tecnológicas, cada vez más eficaces y eficientes, que no estaban disponibles anteriormente.
- 3) Al enfoque integrador de sectores y distritos hidrométricos, para incrementar las eficiencias hidráulica, volumétrica y energética del sistema de abastecimiento de agua.

En nuestro país, y quizá en varias partes del planeta, se vive actualmente con una gran expectativa sobre la sectorización de redes de agua potable, y es tan común el término, que fácilmente se programa como parte de las acciones fundamentales de desarrollo de los sistemas urbanos de abastecimiento de agua. Pero, ¿cuál es la verdadera dimensión de la implementación de un proyecto de sectorización?, es la pregunta que no es fácil de responder, ya que se involucran factores técnicos, sociales, políticos, legales y financieros, que dificultan visualizar los alcances y vuelven muy compleja la solución. En este sentido, las técnicas de planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento, que se han expuesto en el presente libro, dan una visión más completa de la magnitud del problema por resolver.

Es primordial ver a la sectorización de la red de agua potable como una obra de ingeniería y, como en todas ellas, la elaboración del proyecto requiere de información básica, datos estadísticos y estudios de campo, que son indispensables. Sin embargo, para los cuales se deben invertir recursos económicos y tiempo, para disponer de ellos. Asimismo, es necesario realizar también la planeación y el diseño ejecutivo de los sectores de la red, con los planos, el presupuesto, el programa de actividades y la evaluación económica, social y ambiental. Respecto a la construcción de los sectores y puesta en operación, debe programarse la implementación total de la obra, considerando labores de transferencia y capacitación del personal de operación y mantenimiento. Finalmente, se debe cumplir con el objetivo y metas sobre los incrementos de la eficiencias hidráulica, volumétrica y energética del sistema de abastecimiento de agua, para hacer válida la rentabilidad de las inversiones.

En ocasiones, se cuestiona, si la sectorización de la red de distribución de agua debe ser, o no, implementada en los sistemas de agua potable. Si se analizan con cuidado los beneficios que trae consigo para la operación hidráulica, la gestión del control de pérdidas de agua, facilidades para administrar a los usuarios y el desarrollo del sistema a futuro, la sectorización de la red es la solución más viable. Sencillamente por sentido común y práctico, las ciudades tienen un crecimiento muy dinámico; por ende, las redes malladas tradicionales se volverán más complejas con el paso del tiempo. Más allá de que la sectorización de la red de agua sea factible por la gestión de las pérdidas de agua o rentable desde el punto de vista de incremento de eficiencia hidráulica, siempre será más fácil operar, mantener, ampliar, controlar y administrar una red de agua potable dividida en sectores aislados físicamente, concebida estratégicamente con los esquemas descritos en el presente libro, que una red enorme creciendo constantemente por el incremento de la población en las ciudades.

Hoy en día, la disposición de herramientas tecnológicas, como los equipos de telemetría, los sistemas de adquisición de datos automatizado, los modelos de simulación hidráulica de redes de agua, los equipos de medición ultrasónicos y electromagnéticos, las válvulas automáticas, los lectores de micromedición de

radio frecuencia, y los sistemas de cómputo y software de ingeniería; aunado al desarrollo de la teoría de la hidráulica de conducciones a presión, representan un potencial importante para implementar con mayor efectividad el proyecto de sectorización de la red de agua potable. Y aunque el uso de los modelos matemáticos para delimitar los sectores aún se encuentra en una evolución teórica, seguramente en un futuro próximo, se seguirán involucrando más y más variables económicas y físicas, que se volverán parte fundamental de la ingeniería de planeación y diseño de sectores de la red de agua potable.

En México, particularmente, existen ciertos rasgos peculiares y comunes en la mayoría de los sistemas de agua potable, sobre su funcionamiento hidráulico, a saber: el servicio de agua es discontinuo en las redes; hay bajas presiones hidráulicas; la calidad del agua no es apta para beberla; existe un déficit importante en micro y macromedición; hay un nivel elevado de fugas de agua; hay un resquebrajamiento financiero para mantener, renovar o rehabilitar la infraestructura; existen restricciones legales y políticas para operar con efectividad la red; los consumos de energía eléctrica en los equipos de bombeo implican altos costos para el organismo operador de agua. Ante este escenario, difícilmente con los criterios tradicionales de planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de redes de distribución de agua potable se logrará un desarrollo sustentable. Por lo tanto, es necesario implementar nuevos conceptos, tecnologías y políticas, como la sectorización de redes, para que los procesos del sistema de abastecimiento de agua se vuelvan eficientes y eficaces.

Aunque la construcción de sectores de la red se realiza con obras menores (cortes, reconexiones, instalación de válvulas, sustitución de tramos de tuberías, etc.), no por ello deja de ser una obra complicada de ejecutar, debido principalmente a las afectaciones del servicio a los usuarios. Por consiguiente, es necesario programar con sumo cuidado la construcción de sectores y dar aviso a los usuarios para que se prevean ante la escasez del agua, mientras se desarrollan dichas actividades.

Por último, se insiste reiteradamente que durante la fase del desarrollo de la planeación, diseño, construcción y, sobre todo, en la puesta en operación de la implementación de un proyecto de sectorización, debe participar siempre el personal de operación y mantenimiento del organismo operador de agua potable. El efecto positivo que provoca esta integración favorece el éxito del proyecto, ya que ellos se convierten en su mejor promotor, se sienten cómodos con las nuevas actividades, adoptan y hacen suyos los cambios de red, sienten pertenencia institucional al servicio de los usuarios de su ciudad, y ante todo, se asegura la continuidad de la operación de los sectores de la red de agua potable.

APÉNDICE

MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA SECTORIZACIÓN DE REDES



A.1. FUNDAMENTOS

Los modelos matemáticos aplicados al diseño de la sectorización de la red de abastecimiento de agua potable, reportados en la literatura técnica, se orientan en general a calcular automáticamente los límites de los sectores hidrométricos, con la garantía de lograr el buen funcionamiento hidráulico del sistema, referido al cumplimiento de las especificaciones de presiones y caudales mínimos y máximos de agua.

Básicamente, los modelos matemáticos de redes de abastecimiento de agua se elaboran a partir de las ecuaciones fundamentales de continuidad en los nodos y pérdidas de carga hidráulica en las tuberías, las cuales son resueltas con las condiciones de frontera y a partir de una condición inicial (Unidad 3). En el caso particular de los modelos matemáticos para calcular los límites de los sectores en una red, las ecuaciones fundamentales se combinan y resuelven junto con modelos algoritmos de optimización y conectividad.

Cuando se utiliza un modelo matemático de simulación de redes de agua potable que no cuenta con algoritmos para la delimitación automática de sectores hidrométricos (modelos de simulación hidráulica simples), el ingeniero de diseño supone una configuración de sectores hidrométricos dentro del modelo. Luego, realiza una corrida del programa, si los resultados no satisfacen la demanda de agua de los usuarios y los parámetros de distribución de presión y caudal no cumplen con las especificaciones establecidas, entonces se modifican los límites de estos sectores hidrométricos y se vuelven a hacer corridas sucesivas, hasta que se logre el equilibrio entre la oferta de agua suministrada por las captaciones, tanques o rebombeos, con la demanda de agua de los usuarios. A este procedimiento se le conoce como “*Método de prueba y error, o empírico, para delimitar sectores hidrométricos de la red de agua potable*”.

Es muy importante reconocer que la técnica descrita en las unidades 2 y 3 del libro, para planear y diseñar los sectores hidrométricos de una red de abastecimiento de agua potable, NO es método de prueba y error, sino un *Proceso de Ingeniería Aplicada*, que utiliza datos y criterios, organizados y sustentados en la estructura y operación del sistema de agua potable. El modelo de simulación hidráulica se aplica solamente, para diseñar la redistribución del agua en la red interna de los sectores hidrométricos, que previamente han sido delimitados y que satisfacen el equilibrio de la demanda y oferta de agua de la localidad.

El procedimiento de modelación hidráulica, integrada con algoritmos de conectividad a través de la aplicación de la teoría de grafos, para la sectorización de redes de abastecimiento de agua potable, fue propuesta por Tzachtkov, Alcocer y Bourguett, en un artículo publicado en el año 2005 (*Ref. A.1*). Ellos determinaron algoritmos eficientes para: a) obtener subredes separadas, b) Revisar nodos desconectados y, c) determinar la contribución de los puntos de suministro de agua al consumo de los nodos (ver *Figura A-1*).

Algunos otros algoritmos reportados para la delimitación de los sectores hidrométricos de una red son: el de técnicas multiagente (*Ref. A.2*); el de aprendizaje semi-supervisado y de remuestreo de la red, basado en la exploración del grafo con técnicas multiagente (*Ref. A.3*); el que está sustentado en un algoritmo genético y ruta más corta de la red con potencia disipada (*Ref. A.4*) y, por último, el método de topología de la red de expansión de mínimo costo (*Ref. A.5*).

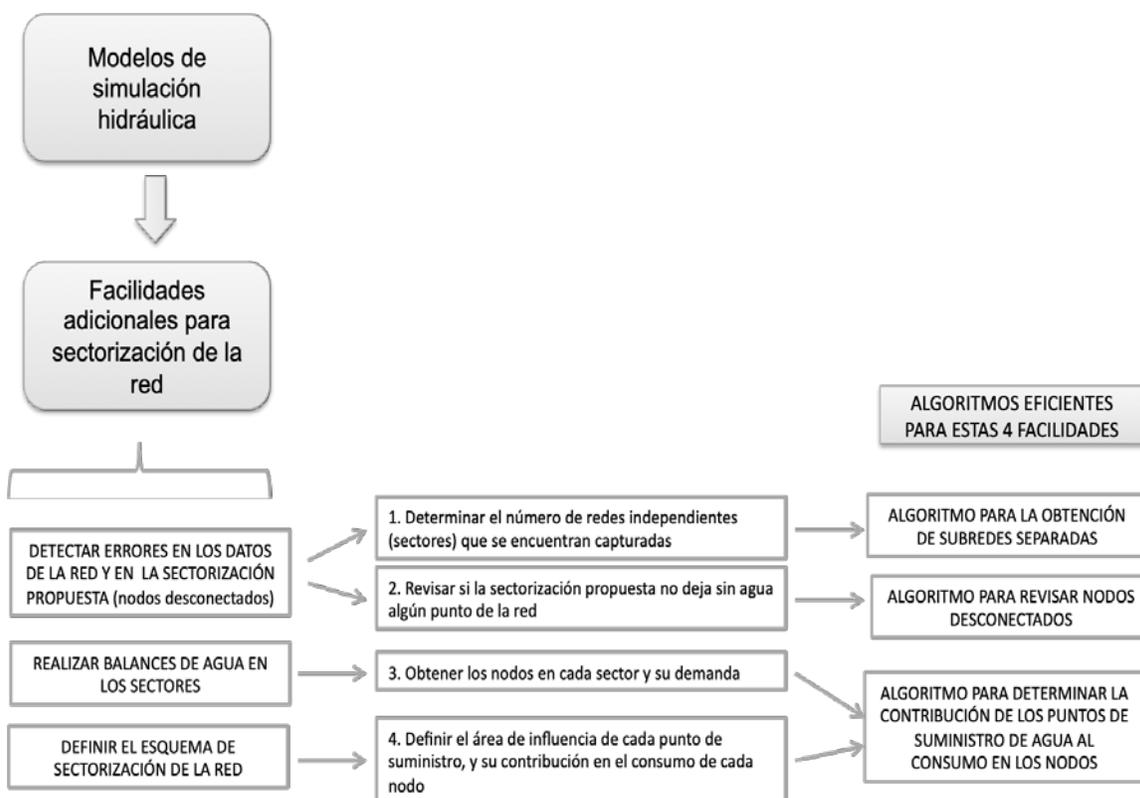


Figura A-1. Modelación hidráulica integrada con algoritmos para la simulación de redes de agua potable, propuesta por Tzachtko, Alcocer y Bourguett.

En este apéndice se describe la teoría de grafos y se expone en particular, el criterio de sectorización de redes con modelos matemáticos, desarrollado por Vegas y Martínez en la referencia A.5, para que el lector pueda apreciar el nivel que presentan en la actualidad y los alcances estas técnicas.

A.2. TEORÍA DE GRAFOS

Un grafo es una sucesión alternada de puntos y líneas que representan un sistema. Entonces, una forma de representar un sistema de abastecimiento agua potable es mediante grafos. En este caso, el grafo estará constituido por puntos llamados vértices o nodos y por aristas o líneas, las cuales conectarán a los vértices siempre y cuando exista una relación entre ellos (Ver Figura A-2).

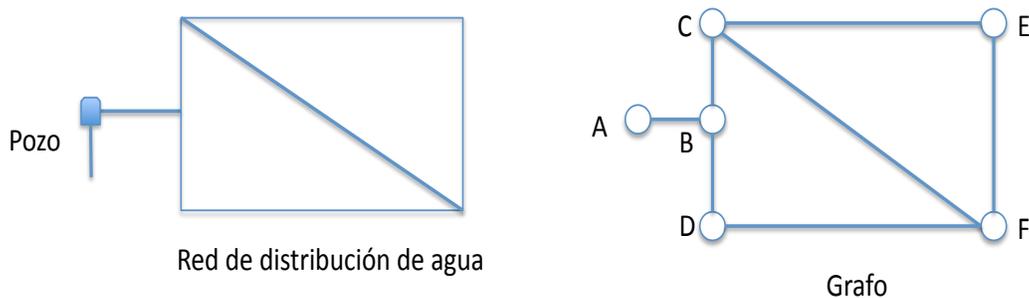


Figura A-2. Representación de un sistema de agua potable mediante grafos.

La exploración o recorrido de un grafo se hace a través de dos métodos distintos: búsqueda en profundidad y en amplitud. El recorrido en profundidad para el grafo de la figura A.2 será: ABCEFD, mientras que la búsqueda en amplitud es: ABCDEF.

Un árbol de expansión es un grafo conexo acíclico (no posee ningún ciclo o malla) que además, contiene todos los vértices del grafo. Los algoritmos de recorrido en profundidad y en amplitud son aplicados en la búsqueda de árboles de expansión en general, y, en particular el árbol de expansión de mínimo costo. Al asociar un peso o costo a cada una de las aristas de un grafo, éste se convierte en un grafo ponderado. En el caso de un modelo de una red de distribución de agua a presión, para definir el árbol de expansión mínimo, es necesario asociar un costo a cada una de las líneas del modelo; normalmente, este costo suele ser función de los parámetros físicos de la red. Entre los principales parámetros físicos que suelen emplearse para definir los costos son:

- Longitud. Produce como resultado un árbol cuyos trayectos desde el nudo fuente considerado hasta cualquier nudo de la red aguas abajo resultan mínimos.
- Diámetro. Con este criterio, los diámetros más grandes son los que marcan las principales ramas del árbol de expansión, configurando la espina dorsal de la red. En el caso de bombas y válvulas activas en el modelo, se les asigna un diámetro ficticio muy alto para incluir dichas líneas en el árbol. Normalmente, los caudales circulan por aquellas tuberías con mayor diámetro, con lo que el árbol resultante proporciona una idea de la capacidad de transporte entre cualquier nudo de la red y otro situado aguas abajo.
- Resistencia hidráulica. El costo en las líneas se fija a través de las ecuaciones de flujo cortante, como Darcy-Weisbach o Hazen-Williams. Este criterio puede ser utilizado para identificar las tuberías más relevantes de la red en términos de capacidad de transporte, es decir, aquellas que presentan una menor resistencia al paso del agua. El árbol obtenido de esta manera se denomina de mínima resistencia hidráulica.
- Caudal o velocidad. En este caso, el árbol de expansión máximo proporciona los caminos o trayectos de la red por los que circula mayor caudal; o bien, lo hace a velocidades más altas.

Existen tres algoritmos clásicos de búsqueda del árbol de expansión de mínimo coste de un grafo ponderado no dirigido: Boruvka (1926), Kruskal (1956) y Prim (1957). De los tres, el más idóneo para obtener el árbol de expansión de mínimo coste de una red de distribución de agua es el algoritmo de Prim. Tanto el algoritmo de Boruvka como el de Kruskal consumen mucho tiempo computacional. El algoritmo de Prim se basa en la exploración individual de todas las aristas del grafo. El algoritmo parte de un vértice cualquiera del grafo. De manera sucesiva, el árbol actual se amplía incorporando nuevas aristas de una en una hasta completar un total. En cada paso, la arista que se añade debe unir un vértice perteneciente al árbol actual con un vértice no perteneciente al mismo y, además, tener un costo mínimo.

La ordenación topológica de un grafo es una técnica que consiste en la reclasificación numérica de todos los vértices pertenecientes a un grafo conexo y acíclico, de tal forma que a cada vértice se le asigna un índice que resulta inferior a los índices de todos los vértices a los que apunta. En caso de no ser un grafo dirigido, la aplicación de esta técnica se basa en la topología de árbol para ir recorriéndolo en el sentido del flujo aguas abajo. La ordenación topológica se realiza recorriendo el grafo mediante el método de búsqueda en profundidad. Es por este motivo, por lo que la solución no es única. En la *Figura A-3* se muestra la ordenación topológica de los nudos de un grafo dirigido; en rojo se ha destacado el orden topológico de cada uno de los vértices tras su ordenación.

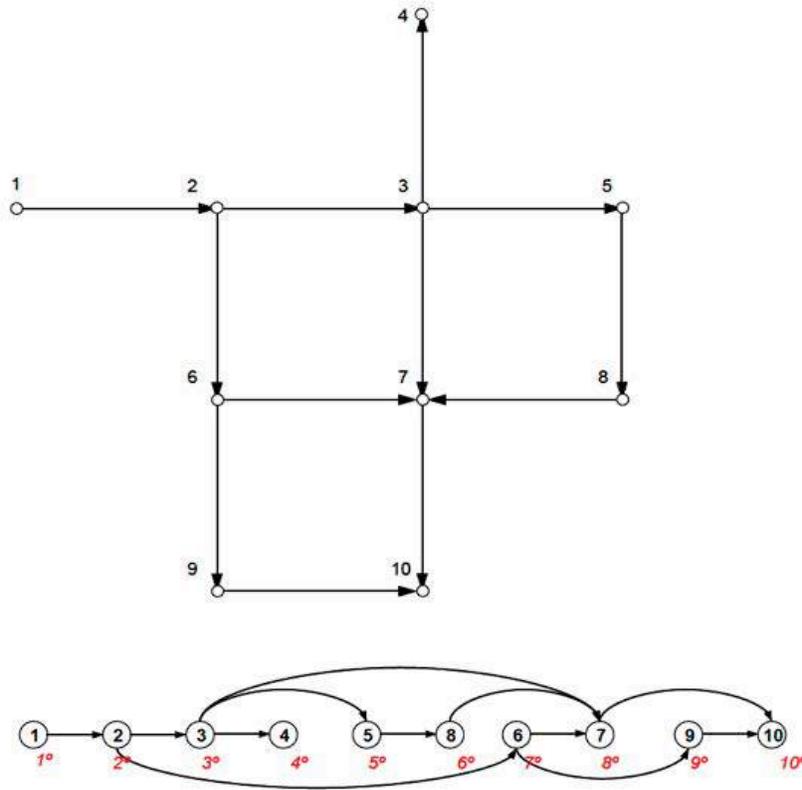


Figura A-3. Grafo dirigido y su homólogo reordenado tras aplicar su ordenamiento topológico.

Fuente: Vegas y Martínez (Ref. A.5).

Se define una “malla” al trayecto simple en el que los vértices inicial y final son coincidentes. Se llama “cuerda” a aquellas aristas no pertenecientes al árbol pero que unen dos vértices del mismo. En general, si en un grafo se define un árbol de expansión, cada una de las cuerdas del grafo formará una malla básica o independiente; es decir, una malla básica estará formada por una única cuerda y al menos una rama. Por tanto, se desprende que en un grafo habrá tantas mallas independientes como cuerdas existan. El procedimiento para identificar una malla básica consiste en recorrer el árbol desde cada uno de los nudos extremos de la cuerda en cuestión, en dirección al nudo raíz; esto es, aguas arriba, hasta encontrar con el nudo común que cierra la malla (ver Figura A-4).

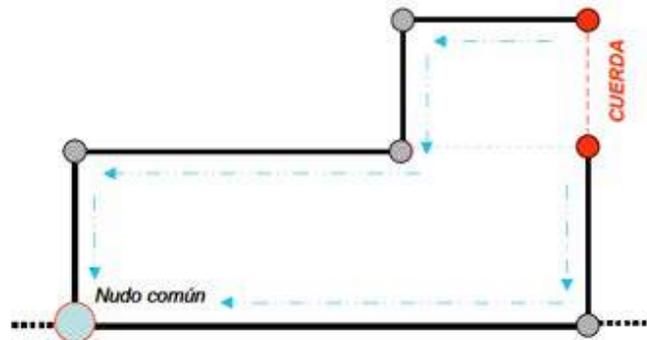


Figura A-4. Identificación de una malla básica o independiente en un grafo. Fuente: Vegas y Martínez (Ref. A.5).

Se conoce como “conjunto de corte de un grafo conexo”, a la serie de aristas tales que si fueran excluidas del grafo principal, dividirían a éste en dos subgrafos conexos, truncando cualquier trayecto posible entre un nudo del primer subgrafo generado y un nudo del segundo subgrafo (Ver *Figura A-5*).

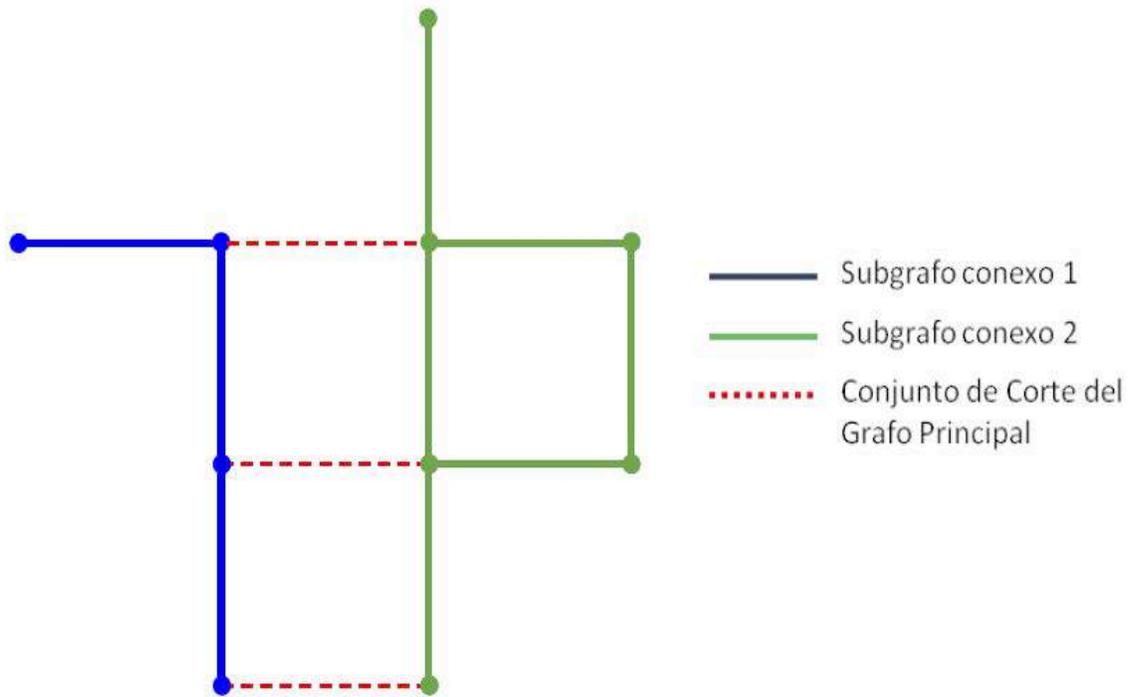


Figura A-5. Conjunto de corte de un grafo. Fuente: Vegas y Martínez (Ref. A.5).

A.3. ALGORITMO DE SECTORIZACIÓN DE REDES DE AGUA POTABLE

El algoritmo para sectorizar una red de agua potable que se presenta en este libro fue desarrollado por Vegas y Martínez (*Ref. A.5*), con base en el trabajo de Tzachtkov et. al, ampliado a la división de sectores de la red y la localización de válvulas de corte y macromedidores para medición de caudal a la entrada de ellos.

La secuencia de pasos para llevar a cabo la sectorización de la red de agua potable con este algoritmo se muestra en la *Figura A-6* y se explica enseguida.

Paso 1) *Identificar los grandes sectores en la red*

Consiste en definir el área de influencia y la contribución de cada fuente sobre el consumo en cada nudo de la red de distribución de agua. Esto se consigue mediante un análisis de calidad del agua con flujo permanente que algunos programas comerciales contienen, como por ejemplo el Epanet. En la *Figura A-7* se muestra un diagrama indicativo de este procedimiento.



Figura A-6. Secuencia de pasos para llevar a cabo la sectorización de la red con el algoritmo de Vegas y Martínez.

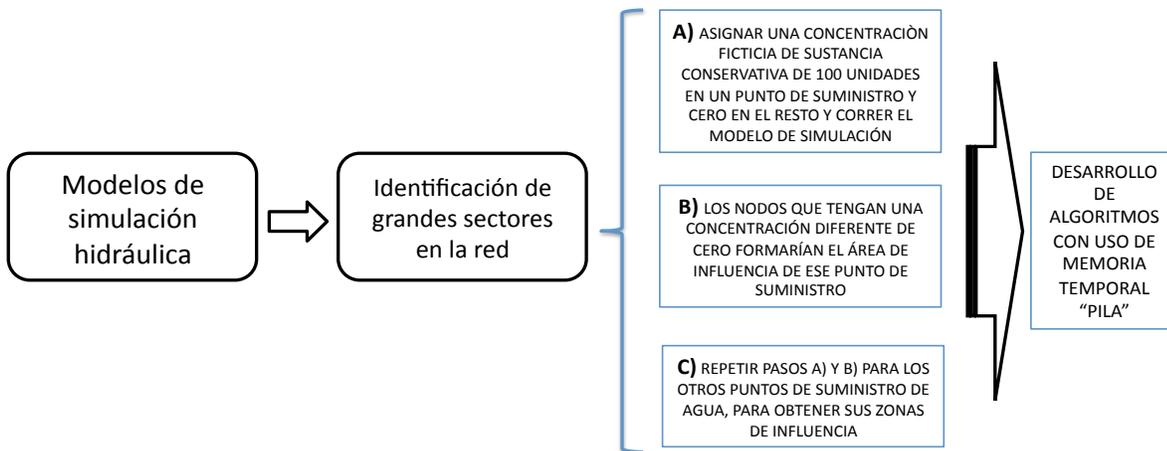


Figura A-7. Diagrama del proceso para obtener los grandes sectores en la red.

Este algoritmo para determinar la contribución de una fuente al consumo en los nudos de la red se desprende del algoritmo de cálculo de la concentración de una sustancia química conservativa en los nudos de la red, dada su concentración en las fuentes de abastecimiento. En la *Figura A-8* muestra cómo se calculan las concentraciones de una sustancia conservativa en los nudos de distribución y de mezcla en una red.

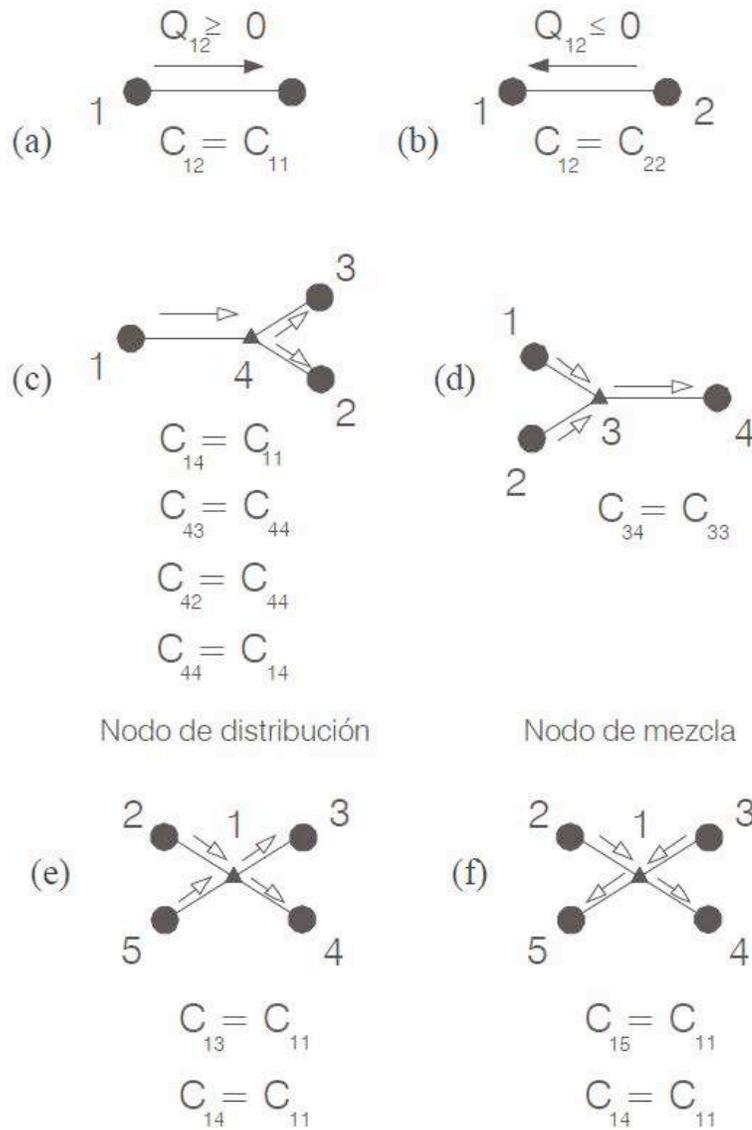


Figura A-8. Concepto del cálculo de la concentración de una sustancia conservativa en nodos de distribución y mezcla en una red. Fuente: Tzachtkov et.al. Ref. A.1

Asumiendo una mezcla completa en el nudo, la concentración en los flujos salientes se calcula con la ecuación:

$$C_{ii} = \frac{\sum_{j \in N_m} Q_j C_{ji}}{\sum_{j \in N_m} Q_j} \quad (\text{A.1})$$

Donde N_{in} representa el conjunto de nodos que aportan agua al nodo i ; la variable Q es el caudal y C es la concentración de la mezcla; la concentración C con subíndices iguales ii se refiere a la concentración de un nodo, y si son diferentes ji , se trata de un tramo.

Ejemplo)

En la Figura A-9 se muestra un esquema de una red con sus valores de carga de presión en los nodos (m) y caudal en sus tramos (L/s), y en la Figura A-10 se presentan los dos grandes sectores que se identificaron, siguiendo el proceso de la Figura A-7.

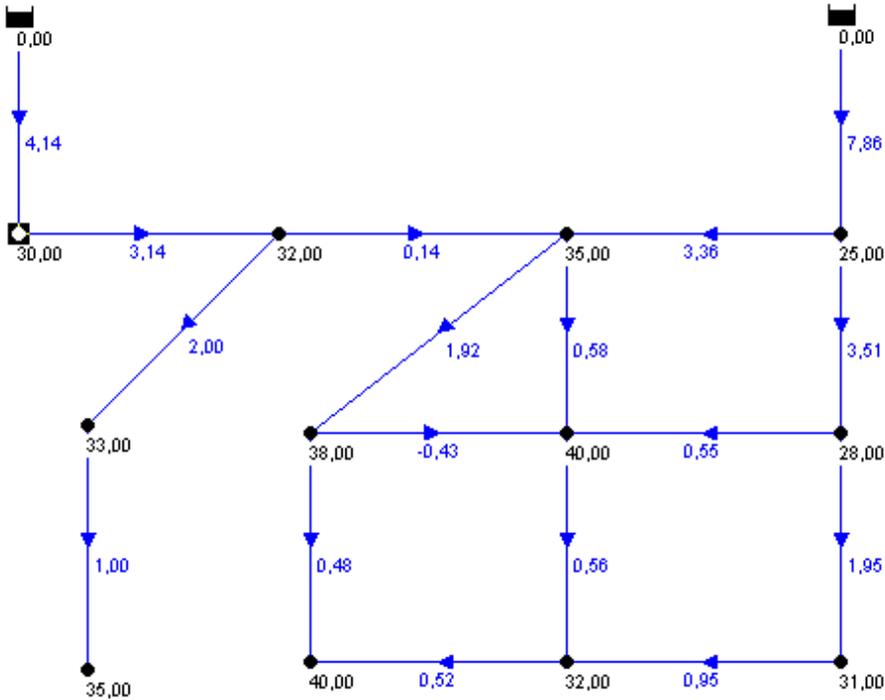


Figura A-9. Esquema de la red del ejemplo, con valores de presión y caudal.

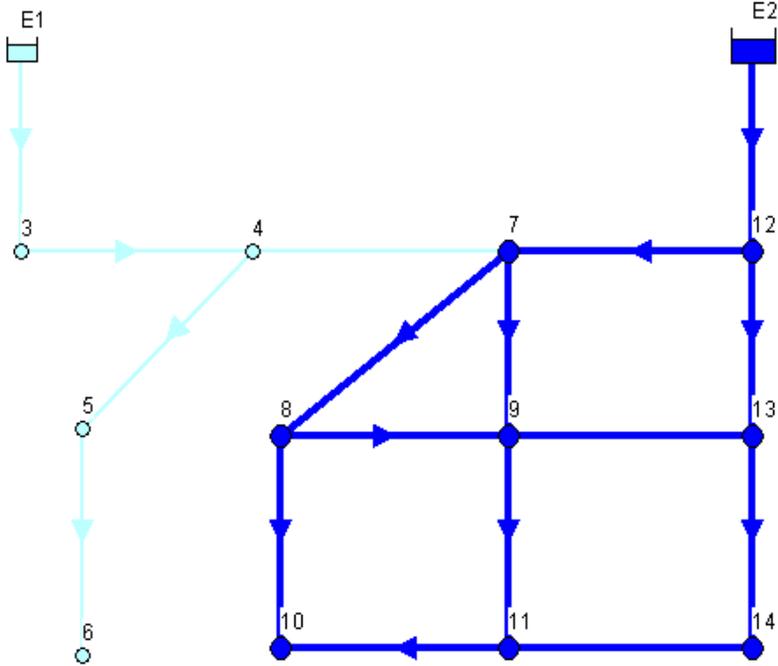


Figura A-10. Grandes sectores identificados en el esquema de la red del ejemplo.

Paso 2) Identificar la red arterial

Con este paso se consigue que la red arterial no forme parte de los sectores, para abaratar los costos en la compra de medidores de menor tamaño (diámetro de tubería donde se instalará el medidor de caudal). Este proceso se consigue aplicando el algoritmo de búsqueda en profundidad. Se parte de cada una de las fuentes operativas que participan en la sectorización y se va recorriendo todos los nudos posibles, siguiendo el mismo sentido del flujo en las tuberías. El algoritmo se detendrá cuando el diámetro de un tramo de tubería es menor que el valor especificado como dato de entrada desde el formulario de la herramienta.

Ejemplo)

Continuando con la red del ejemplo, en la Figura A-11 se muestra la red arterial identificada para un diámetro mayor a 200 milímetros.

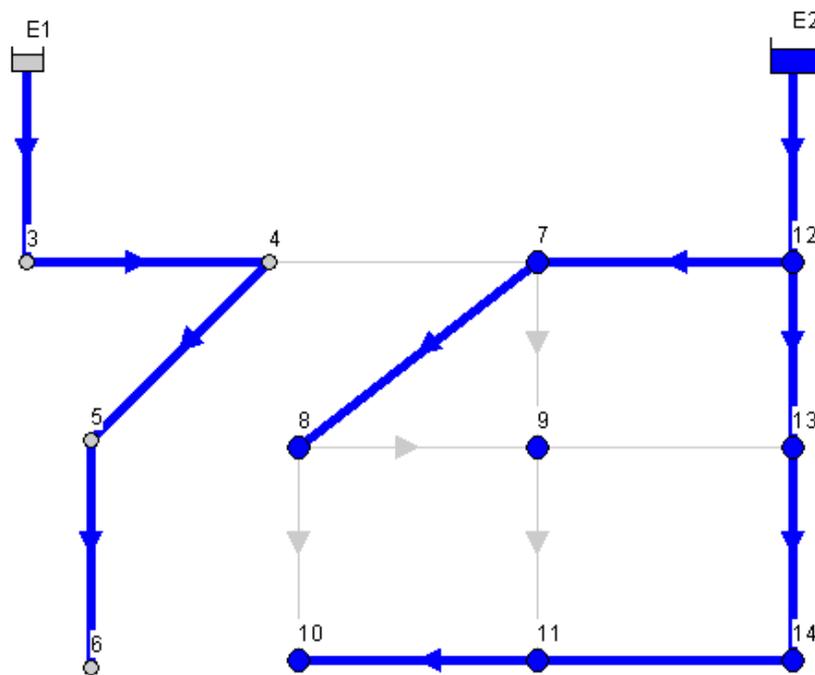


Figura A-11. Red arterial identificada en la red del ejemplo para tubos mayores a 200 mm.

Paso 3) Crear los árboles dirigidos de mínimo costo

Primero se asignan a las tuberías alguna función de costo (longitud, diámetro, Resistencia al flujo, etc.). Luego, se aplica el algoritmo de búsqueda en amplitud de Prim, para obtener todos los árboles dirigidos que se asocien a cada fuente de suministro de la red, distinguiendo las tuberías que son ramas y cuerdas.

Ejemplo)

En la Figura A-12 se presentan los tres árboles dirigidos de mínimo costo que resultaron del análisis de la red del ejemplo, considerando el caudal como parámetro físico de costo.

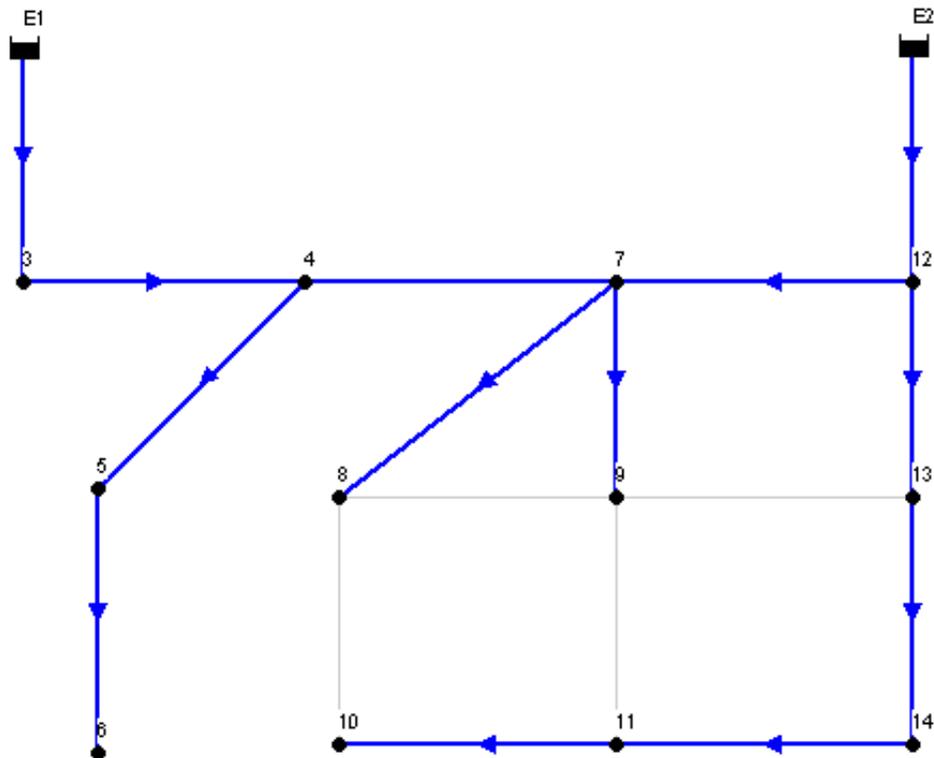


Figura A-12. Árboles dirigidos de mínimo costo de la red del ejemplo.

Paso 4) Ordenar la topología de la red

El ordenamiento topológico de la red se hace para ir almacenando en una lista los nodos que se van visitando del árbol dirigido de mínimo costo, para cada fuente partiendo desde éste. El recorrido se hace mediante el algoritmo de búsqueda en profundidad.

Paso 5) Determinar el conjunto de corte de cada rama

Consiste en asociar a cada rama un conjunto de cuerdas. Para ello, se utilizará la lista de cuerdas antes almacenadas en una colección de “almacenadas” en el paso 3. Se extraerán sus nodos extremos de cada cuerda y se procederá a viajar en sentido aguas arriba hasta llegar a la fuente de suministro de agua. Lo que se pretende es encontrar el nudo común donde se interceptan ambos nodos extremos de la cuerda.

Paso 6) Crear los sectores de la red

Primero, se seleccionan los criterios de sectorización como la longitud o demanda máxima por sector. Los medidores se localizarán en las ramas del árbol donde se ha alcanzado un valor igual o mayor al especificado como dato de entrada, y las válvulas de corte se ubicarán en el conjunto de cuerdas asociadas a la rama donde se instalará dicho medidor. En caso de no haber conjunto de cuerdas, sólo se instalará el medidor. Para ello, se recorren los árboles dirigidos de mínimo costo de cada fuente desde los nodos más alejados, revisando en cada nudo o línea la propiedad acumulada (criterio de sectorización elegido), en el cual, si el valor acumulado es igual o mayor que el valor máximo para crear sectores, el algoritmo se para y guarda ese ID de tubería de acceso en una lista para medidores. Luego, se revisa si

tiene un conjunto de corte asociado a la rama. En caso de ser así, se almacena en otra lista los ID de tuberías (cuerdas) donde se localizarán las válvulas de corte.

Ejemplo)

En la Figura A-13 se muestra el esquema final de sectores que resulta en la red del ejemplo, con la ubicación de las válvulas y macromedidores necesarios.

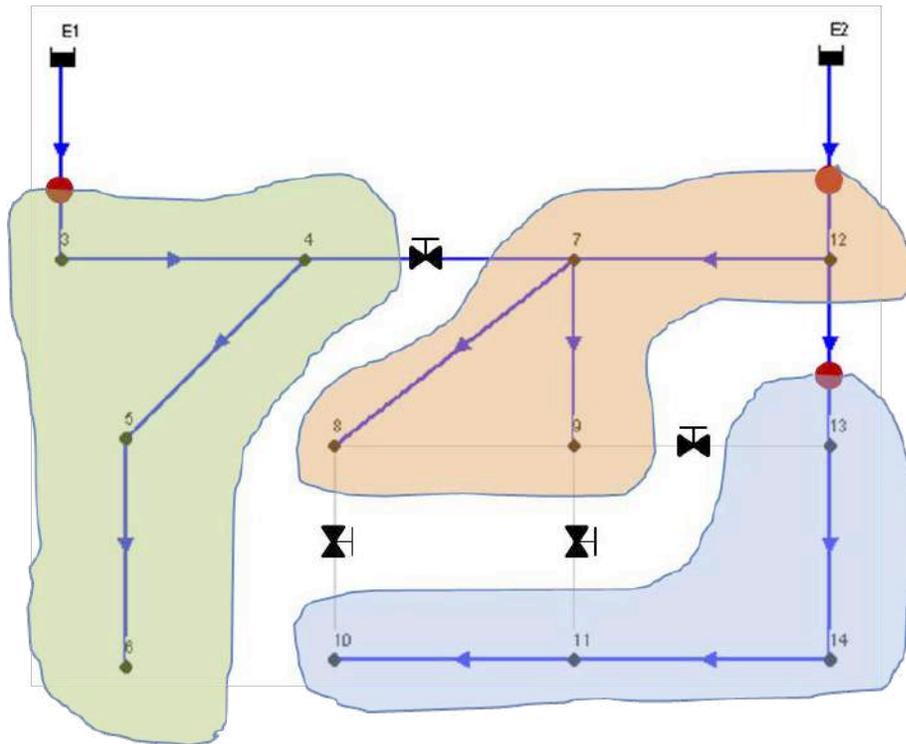


Figura A-13. Esquema de sectores resultante en la red del ejemplo.

Los algoritmos que se han desarrollado para delimitar los sectores de la red en los modelos matemáticos se integran a los modelos de simulación hidráulica comerciales, como el *ScadRed*, desarrollado por el IMTA, o el *Epanet*, mediante modificaciones en el código fuente del programa.

El algoritmo de Vegas y Martínez, que se ha descrito arriba se codificó en un entorno de programación *Visual Basic 6.0* y se enlazó al *Epanet* (en su versión *GisRed*) mediante una librería externa, agregando tres pestañas al programa: datos de entrada, selección de fuentes de suministro de agua y criterios de sectorización. En la *Figura A-14* se muestra el ambiente del *GisRed* con la nueva herramienta de sectorización que se ha incluido por estos autores.

Hablando del futuro de la sectorización de redes de agua potable con modelos matemáticos de simulación hidráulica, seguramente se seguirán desarrollando estas técnicas y cada día integrarán algoritmos que tomen en cuenta las variables asociadas con la realidad de estos sistemas de abastecimiento de agua. Además, es muy importante considerar que los procedimientos de planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento que se plantearon a lo largo del libro, complementarán el uso de esta tecnología y juntas potenciarán los diseños de redes sectorizadas.

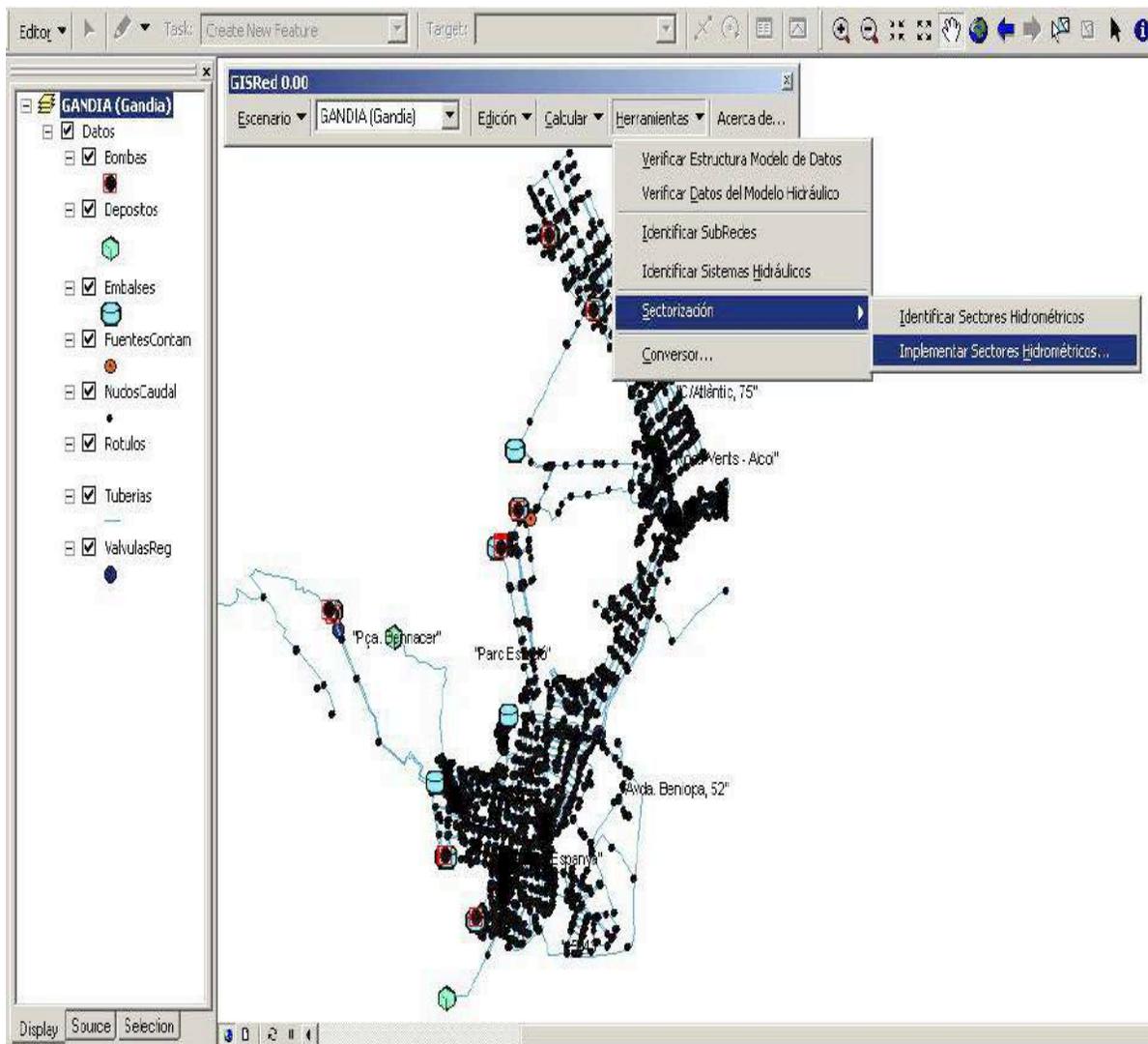


Figura A-14. Herramienta de sectorización en el GisRed, con el algoritmo de Vegas y Martínez.

Referencias

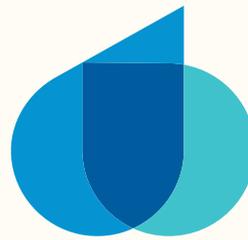
[A.1] Tzatchkov, V.G.; Alcocer-Yamanaka, V.H.; Bourguett-Ortíz, V. (2006) “Graph theory based algorithms for water distribution network sectorization projects”, VIII Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium (Cincinnati, Ohio, USA).

[A.2] Izquierdo, J.; Herrera, M.; Pérez-García & Ayala-Cabrera D. (2009) “Agent-based division of water distribution systems into District Metered Areas”, ICSOFT 2009: Proceedings of the IV International Congress of Software and Data Technologies (Sofia, Bulgaria), Vol. 2, pp. 83-90.

[A.3] Herrera, M., Canu, S., Karatzoglou, A., Pérez-García, R. & Izquierdo, J. (2010) An approach to water supply clusters by semi-supervised learning. Proceedings of International Environmental Modelling and Software Society (IEMSS), Fifth Biennial Meeting, Ottawa, Canada.

[A.4] Di Nardo A., Di Natale M., Santonastaso G. F., Tzatchkov V. G. and Alcocer-Yamanaka V. H. (2013), “Water network sectorization based on a genetic algorithm and minimum dissipated power paths, Water Science & Technology: Water Supply, Vol 13.4, IWA.

[A.5] Vegas N.O. y Martínez A.F. (2012), “Herramientas de ayuda a la sectorización de redes de abastecimiento de agua basadas en la teoría de grafos aplicando distintos criterios” Tesina de Máster, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, UPV, España.



aneas

ISBN: 978-607-96014-6-1

