

MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

MEJORA DE EFICIENCIA FÍSICA

39



MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

MEJORA DE EFICIENCIA FÍSICA

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento
Mejora de Eficiencia Física

ISBN: 978-607-626-007-4

D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines en la Montaña
C.P. 14210, Tlalpan, México, D.F.

Comisión Nacional del Agua
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo
C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.
Tel. (55) 5174 4000

Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

Impreso y hecho en México
Distribución gratuita. Prohibida su venta.
Queda prohibido su uso para fines distintos al desarrollo social.
Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra,
sin fines de lucro y citando la fuente.

CONTENIDO

Presentación	VII
Objetivo general	IX
Introducción a la mejora de eficiencia física	XI
1. Generación de datos básicos	1
1.1. Recopilación y análisis de información	1
1.2. Campaña de medición	4
1.2.1. Medición de presiones en la red	4
1.2.2. Medición de caudales suministrados	5
1.2.3. Medición de variación de la demanda de agua en la red	6
1.2.4. Medición de errores de exactitud en macromedidores	7
1.2.5. Muestreo de consumos de cuota fija	8
1.2.6. Muestreo de errores de exactitud de micromedidores	10
1.2.7. Muestreo de ocurrencia de fugas	13
1.2.8. Levantamiento de cajas de válvulas	17
1.2.9. Levantamientos topográficos	18
1.2.10. Vinculación de tomas domiciliarias	19
1.2.11. Medición de parámetros eléctricos e hidráulicos en equipos de bombeo	21
2. Eficiencia física	35
2.1. Diagnóstico de eficiencia física	35
2.1.1. Hoja de cálculo, periodo de análisis y unidad de medida	38
2.1.2. Cuantificación del suministro de agua	38
2.1.3. Estimación de consumos medidos autorizados	40
2.1.4. Estimación de consumos no medidos autorizados	40
2.1.5. Cálculo de pérdidas identificadas y eliminadas	41
2.1.6. Estimación de pérdidas potenciales totales	46
2.1.7. Pérdidas reducibles y acciones	47
2.1.8. Beneficios de la reducción de fugas	48
2.1.9. Costo y tiempo de la reducción y control de fugas	49
2.2. Proyecto de eficiencia física	50
2.2.1. Elaboración de diagnóstico de la situación actual de fugas	51
2.2.2. Identificación de causas que originan el estado actual de fugas	51
2.2.3. Diseño de medidas preventivas y facilitadoras de la reducción y control de fugas	58
2.2.4. Definición de acciones para la eliminación intensiva de fugas para alcanzar un nivel aceptable	59
2.2.5. Diseño del programa permanente de control de fugas para mantener un nivel aceptable	67

3. Eficiencia hidráulica	69
3.1. Diagnóstico de eficiencia hidráulica	69
3.1.1. Consumo unitario de los usuarios	69
3.1.2. Dotación	70
3.1.3. Continuidad del servicio agua	70
3.1.4. Déficit entre el caudal de agua disponible en la red y el caudal de agua requerido por los usuarios	71
3.1.5. Presión media del agua en la red de distribución	71
3.1.6. Elaboración del diagnóstico de eficiencia hidráulica	72
3.2. Proyecto de eficiencia hidráulica	82
3.2.1. Conformación de sectores para redistribución de caudales y presiones en la red	84
3.2.2. Elaboración del modelo de simulación hidráulica de la red	92
3.2.3. Análisis hidráulico de la red sectorizada	94
3.2.4. Análisis hidráulico de las condiciones para entrega de agua en bloque	100
3.2.5. Estrategias para la puesta en marcha del proyecto de sectorización	102
4. Proyectos de eficiencia integral	109
4.1. La evolución de los enfoques de eficiencia física, hidráulica y energética	109
4.2. Estructura del proyecto de eficiencia integral	112
4.2.1. Trabajos preliminares	113
4.2.2. Evaluación física y generación de datos básicos	114
4.2.3. Evaluación de la disponibilidad de agua	115
4.2.4. Desarrollo del proyecto de eficiencia hidráulica	116
4.2.5. Elaboración del proyecto de eficiencia energética (PEE)	116
4.2.6. Cálculo de indicadores de evaluación	117
4.2.7. Puesta en marcha de los sectores hidráulicos y reducción de pérdidas de agua	118
4.3. Medidas de ahorro de energía resultantes de la optimización de la operación hidráulica	118
4.3.1. Operación de equipos de bombeo fuera de hora punta	119
4.3.2. Cambio de condiciones de carga y gasto en equipos existentes	124
4.3.3. Aplicación de velocidad variable en equipos que inyectan directo a la red	126
4.3.4. Paro definitivo de equipos como resultado de un programa de reducción de fugas	129
4.3.5. Cuantificación de ahorros de energía totales	131
5. Indicadores de eficiencia	133
5.1. Indicador Energético (IE)	134
5.2. Indicador de costo unitario de energía (CUE)	135
5.3. Indicador de eficiencia física (IEF)	135
5.4. Dotación promedio por habitante (Dp)	136
5.5. Indicador de continuidad en el servicio (ICS)	136

Conclusiones	137
Anexos	
A.1. Formatos para recopilación de información y datos	139
A.2. Propiedades hidráulicas y medición	151
A.3. Formato del balance de agua	153
Bibliografía	155
Tabla de conversiones de unidades de medida	157
Ilustraciones	167
Tablas	171



PRESENTACIÓN

Uno de los grandes desafíos hídricos que enfrentamos a nivel global es dotar de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a la población, debido, por un lado, al crecimiento demográfico acelerado y por otro, a las dificultades técnicas, cada vez mayores, que conlleva hacerlo.

Contar con estos servicios en el hogar es un factor determinante en la calidad de vida y desarrollo integral de las familias. En México, la población beneficiada ha venido creciendo los últimos años; sin embargo, mientras más nos acercamos a la cobertura universal, la tarea se vuelve más compleja.

Por ello, para responder a las nuevas necesidades hídricas, la administración del Presidente de la República, Enrique Peña Nieto, está impulsando una transformación integral del sector, y como parte fundamental de esta estrategia, el fortalecimiento de los organismos operadores y prestadores de los servicios de agua potable, drenaje y saneamiento.

En este sentido, publicamos este manual: una guía técnica especializada, que contiene los más recientes avances tecnológicos en obras hidráulicas y normas de calidad, con el fin de desarrollar infraestructura más eficiente, segura y sustentable, así como formar recursos humanos más capacitados y preparados.

Estamos seguros de que será de gran apoyo para orientar el quehacer cotidiano de los técnicos, especialistas y tomadores de decisiones, proporcionándoles criterios para generar ciclos virtuosos de gestión, disminuir los costos de operación, impulsar el intercambio de volúmenes de agua de primer uso por tratada en los procesos que así lo permitan, y realizar en general, un mejor aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas del país, considerando las necesidades de nueva infraestructura y el cuidado y mantenimiento de la existente.

El Gobierno de la República tiene el firme compromiso de sentar las bases de una cultura de la gestión integral del agua. Nuestros retos son grandes, pero más grande debe ser nuestra capacidad transformadora para contribuir desde el sector hídrico a **Mover a México**.

Director General de la Comisión Nacional del Agua



OBJETIVO GENERAL

El *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (MAPAS) está dirigido a quienes diseñan, construyen, operan y administran los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento del país; busca ser una referencia sobre los criterios, procedimientos, normas, índices, parámetros y casos de éxito que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en su carácter de entidad normativa federal en materia de agua, considera recomendable utilizar, a efecto de homologarlos, para que el desarrollo, operación y administración de los sistemas se encaminen a elevar y mantener la eficiencia y la calidad de los servicios a la población.

Este trabajo favorece y orienta la toma de decisiones por parte de autoridades, profesionales, administradores y técnicos de los organismos operadores de agua de la República Mexicana y la labor de los centros de enseñanza.



INTRODUCCIÓN A LA MEJORA DE EFICIENCIA FÍSICA

La eficiencia de un sistema de abastecimiento de agua potable a ciudades se asocia con el proceso de captar, conducir, regularizar, potabilizar y distribuir el agua, desde la fuente natural hasta los consumidores, con un servicio de calidad óptima. En relación con la eficiencia, se identifican tres escenarios (Ochoa, 2005):

- La ingeniería del sistema de abastecimiento
- La comercialización de los servicios de agua potable
- El desarrollo institucional del organismo operador

Desde estos tres escenarios, un sistema hidráulico que abastece agua potable deja de ser eficiente para prestar el servicio de calidad a los usuarios de una población, cuando comienza a utilizar excesivos recursos humanos, materiales y económicos.

En cuanto al desarrollo institucional del organismo operador de agua potable, se desatienden las eficiencias en la autonomía organizativa, el liderazgo de su personal directivo, la administración del personal, la orientación financiera, los esquemas orientados hacia el consumidor, la capacidad técnica del personal, la capacitación del personal y la interacción con instituciones externas. El resultado de esta desatención es 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 las actividades de comercialización del servicio, se desatienden la eficiencia de las áreas de facturación, cobranza, contabilidad, padrón de usuarios, estimación de consumos, tarifas, control de suministros, comunicación social y transporte. Como consecuencia,

surgen los problemas de usos clandestinos, baja cobertura de micro-medición, usos mal clasificados e identificados, cartera vencida importante, esquemas tarifarios irreales, altos consumos de materiales y equipos y un deterioro en la comunicación con el usuario que impacta directamente en la cultura que hoy en día se tiene del agua.

Por último, en el área de ingeniería (actividades de producción y distribución), se descuida la eficiencia de la condición hidráulica del sistema, la hermeticidad de la red e infraestructura, de los sistemas de bombeo e instalaciones electromecánicas y de la calidad del agua que se proporciona. Los descuidos de estas actividades de ingeniería ocasionan servicios discontinuos del agua a los usuarios (tandeos), entrega de agua a los consumidores con bajas presiones, niveles de fugas de agua que llegan a alcanzar hasta 50 por ciento del volumen suministrado, agua no potable en las tomas domiciliarias y excesivos consumos de energía en los equipos de bombeo con implicaciones económicas hasta de 35 por ciento de los ingresos del organismo operador.

Este libro se fundamenta en el *Manual de incremento a la eficiencia física*, publicado por Conagua en 2009, en el que se aborda la eficiencia en el escenario de ingeniería de producción y distribución, en particular la eficiencia física e hidráulica, desde la perspectiva que prevalece actualmente en los sistemas hidráulicos de agua potable del país. Las aplicaciones y acciones proyectadas obedecen a lo siguiente:

- Están basadas en información y datos disponibles que generan un mínimo de datos complementarios
- Aprovechan al máximo la infraestructura existente
- Arrojan soluciones prácticas, económicas y de implantación a corto plazo
- Los resultados garantizan una mejor calidad del servicio de agua a los usuarios (tendencia a obtener cero tandeos)
- Fomentan el ahorro de agua y energía para el organismo operador

La razón principal es transferir los procedimientos clave para elaborar proyectos de eficiencia a los técnicos involucrados en tareas afines, con el fin de que puedan replicarlos en cualquier población de México. Además, se complementa con los libros *Rehabilitación de Pozos* y *Eficiencia Energética, Uso Eficiente y Ahorro de la Energía*, del MAPAS.

Con la intención de facilitar su comprensión, el libro se ha estructurado en cinco secciones y varios anexos. La primera sección nos habla de la información que hay que recopilar en el sistema de agua potable y el organismo operador, para elaborar un diagnóstico y proyecto de eficiencia. También, se muestran los métodos de medición en campo que son necesarios para completar los datos básicos. En la segunda sección del libro se presentan los procesos que se deben tener en cuenta para realizar un proyecto de eficiencia física del sistema de abastecimiento de agua potable, orientado por un lado a eliminar las fugas de agua y, por otro, a controlar el nivel de fugas alcanzado. En la sección tres se describen los elementos necesarios para realizar un proyecto de eficiencia hidráulica de la red de distribución de agua potable. En concreto, se promueve la redistribución de caudales y presiones en la red, con base en un esquema de sectorización, apoyando su diseño en un modelo de simulación hidráulica, que contenga a detalle todos los tramos de tubería, válvulas, tanques, rebombes, pozos y tanques de regulación. En la sección cuatro se muestra una propuesta para incrementar en forma integral la eficiencia física, hidráulica y energética, con el fin de multiplicar los ahorros de agua y energía en un sistema de agua potable. Se abordan los métodos para implementar acciones de ahorro de energía del lado del suministro y demanda, planteada para aplicarse en el mediano plazo en combinación con el incremento de las eficiencias física e hidráulica del sistema de agua potable. En la sección cinco se muestran los principales indicadores de evaluación, cuya aplicación es recomendada para determinar la eficiencia de los sistemas de agua potable en el escenario de la ingeniería de producción y distribución.

Finalmente, se incluyen una serie de anexos, que proporcionan ayuda adicional y fortalecen los procedimientos del libro.



1

GENERACIÓN DE DATOS BÁSICOS

La generación de datos básicos se realiza de dos maneras:

- a) Recopilando y analizando la información del organismo operador
- b) Mediante una campaña de medición

1.1. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

La información que que deberá generar y recopilar el organismo operador (o empresa a cargo del estudio), se muestra de la Tabla 1.1 a la Tabla 1.5.

Es conveniente que la información se encuentre actualizada y de preferencia en formato digital. Se recomienda verificar su grado de confiabilidad y efectuar recorridos de campo para cotejarla y ratificarla. También es conveniente recurrir a bases de datos alternas, como las públicas virtuales y la información que proporcionan entidades federales, estatales y municipales, tales como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Instituto de Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Comisiones Estatales de Agua, etc. En el anexo A.1 se presentan varios formatos para facilitar la recopilación de información.

Tabla 1.1 Información general que recopila el organismo operador

Área	Fuente de información	Información para recopilar	Observaciones
General	Padrón de usuarios	Número de tomas domiciliarias	Clasificadas por tipo de uso, con o sin medidor
		Número de tomas por colonias	Domésticas y no domésticas
		Número de tomas por clase socioeconómica	Clase popular, media y residencial
		Número de tomas por ruta de lectura	Domésticas y no domésticas
	Relación y estudios de factibilidades	Cobertura de la red y del servicio	En porcentaje de área y de habitantes
		Zonas de crecimiento de población	Colonias o fraccionamientos en proceso con número de tomas
	Oficinas gubernamentales	Clima	Temperatura media anual, máxima, mínima; precipitación media anual
		Índice de hacinamiento	Número de personas por vivienda o toma domiciliaria doméstica
		Población histórica	De los últimos tres censos y conteos nacionales
		Planos de traza de calles, colonias y nombres	Georeferenciado con escala real e imagen satelital

Tabla 1.2 Información que recopila el área técnica del organismo operador

Área	Fuente de información	Información a recopilar	Observaciones
Técnica	Estadísticas de producción	Volúmenes suministrados al sistema	Resumen mensual; mínimo un año inmediatamente anterior
		Caudales producidos en las captaciones	Medios anuales, máximos diarios y máximos horarios, para época de verano e invierno en climas extremos
		Características de los macromedidores instalados en puntos de suministro	Tipo, modelo, fecha de instalación y calibración, diámetro
	Archivos digitales y mapotecas	Planos de la red de agua potable	A escala real, geo referenciados, con diámetros, materiales, rugosidades y longitudes de tubería, cotas topográficas en cruceros y tipos, ubicación de pozos, rebombes y tanques, válvulas; preferentemente en formato digital
		Planos de perfiles de conducciones	Con indicaciones de cambio de diámetro y material; ubicación de válvulas de aire y desfogue
		Planos de topografía	En planta con curvas de nivel a cada 0.5 metros en terreno muy accidentado y a cada 2 metros en superficies planas; preferentemente en formato digital
		Proyectos ejecutivos anteriores	Se pueden obtener datos adicionales de planos y mediciones
		Planos de lotificación y predios	Preferentemente en formato digital
		Croquis de detalle de fontanería	De rebombes, tren de descarga de pozos, tanques de regulación, con simbología oficial
	Estadísticas de mantenimiento	Ocurrencia histórica de fugas	Registro anual de fugas ocurridas en tomas domiciliarias, tubería, red y válvulas; reportadas y reparadas mensualmente, tipos de falla, caudales unitarios vs presión, y tiempos de reparación

Tabla 1.3 Información que recopila el área comercial del organismo operador

Área	Fuente de información	Información para recopilar	Observaciones
Comercial	Facturación	Consumos de agua por tipo de usuario	Registro anual de los volúmenes mensuales por tipo de usuario, colonia o rutas de lectura, para cuota fija y servicio medido
	Estadísticas de mantenimiento	Políticas de facturación y cobro	Usuarios exentos de pago, usos públicos, escuelas, hoteles y usuarios con cuota fija, usos irregulares y clandestinos
		Características de micro-medidores	Tipos, modelos, año de fabricación y clase de aparatos, coberturas geográficas, errores históricos de exactitud, ocurrencia, fecha de instalación y tiempo

Tabla 1.4 Información que recopila el área institucional del organismo operador

Área	Fuente de información	Información para recopilar	Observaciones
Institucional	Informes ejecutivos	Indicadores de gestión	Indicadores de eficiencia física, hidráulica y energética, evolución histórica en un año, impactos, beneficios y costos
		Planes maestros y de factibilidad	Programas proyectados, inversiones a corto y largo plazo, proyectos de eficiencia en desarrollo, metas anuales
		Organigrama de la institución	Describir funciones, personal e interrelación con otras áreas
		Programas interinstitucionales	Programas de eficiencia que se están ejecutando con recursos aportados por CONAGUA, entidades estatales y municipales

Tabla 1.5 Información que recopila el área operativa del organismo operador

Área	Fuente de información	Información para recopilar	Observaciones
Operativa (energética)	Facturación de energía eléctrica	Datos generales del suministro eléctrico	Nombre de la compañía eléctrica que proporciona el servicio, tensión, tarifa por equipo de bombeo, historial mensual de facturación en un año (demanda máxima, consumo de kilowatts hora, factor de potencia), horarios de operación
	Planos, inventario de equipos y recorrido de campo	Infraestructura eléctrica	Diagrama unifilar (calibre, protecciones, transformadores, motores, capacitores y generadores); acometida (tipo, elemento desconectador, apartarrayos, fusibles); subestación eléctrica (tipo, número de transformadores, sistema de tierras); transformadores (identificación, tipo, capacidad nominal, relación de transformación, antigüedad); capacitores (ubicación, capacidad, tipo de banco, elemento desconectador, estado); arrancador (tipo, capacidad); conductores eléctricos (número de hilos, longitud, calibre, material, tipo de aislamiento); motor eléctrico (marca, tipo, capacidad, tensión de suministro, corriente nominal, número de polos, velocidad a plena carga, factor de servicio, eficiencia nominal, antigüedad, número de rebobinados, temperatura)
		Infraestructura mecánico-hidráulica	Bombas (identificación, marca, tipo, modelo, material de carcasa, material del impulsor, caudal de diseño, carga de diseño, eficiencia de diseño); succión (nivel dinámico en acuífero y cárcamo); características del tren de descarga, historial de niveles dinámicos en un año; características de la operación; condiciones de succión y descarga; destino del fluido bombeado y operación
	Mantenimiento	Bitácoras de mantenimiento, programas institucionales	Registro histórico y reciente de actividades, reparaciones a motores y bombas, registro de monitoreo de variables

1.2. CAMPAÑA DE MEDICIÓN

La campaña de medición está dividida en la recopilación de datos hidráulicos y en trabajos electromecánicos en equipos de bombeo, como se muestra en la Tabla 1.6.

A continuación se detallan recomendaciones para efectuar las mediciones, obtener mejores resultados en el registro de datos y evitar costos y tiempos excesivos.

1.2.1. MEDICIÓN DE PRESIONES EN LA RED

La medición de presiones se realiza con un manómetro comercial tipo Bourdon conectado en las tomas domiciliarias del sistema de distribución (ver Ilustración 1.1) existe una base teórica

específica para determinar el número de puntos de medición de presiones en la red, ya que depende de la extensión de la ciudad. Sin embargo, es recomendable realizar un punto de medición de presión por cada 270 tomas domiciliarias registradas, con el fin de tener una cobertura adecuada de medición para los fines de un buen diagnóstico y ajuste del modelo de simulación hidráulica del sistema de abastecimiento de agua.

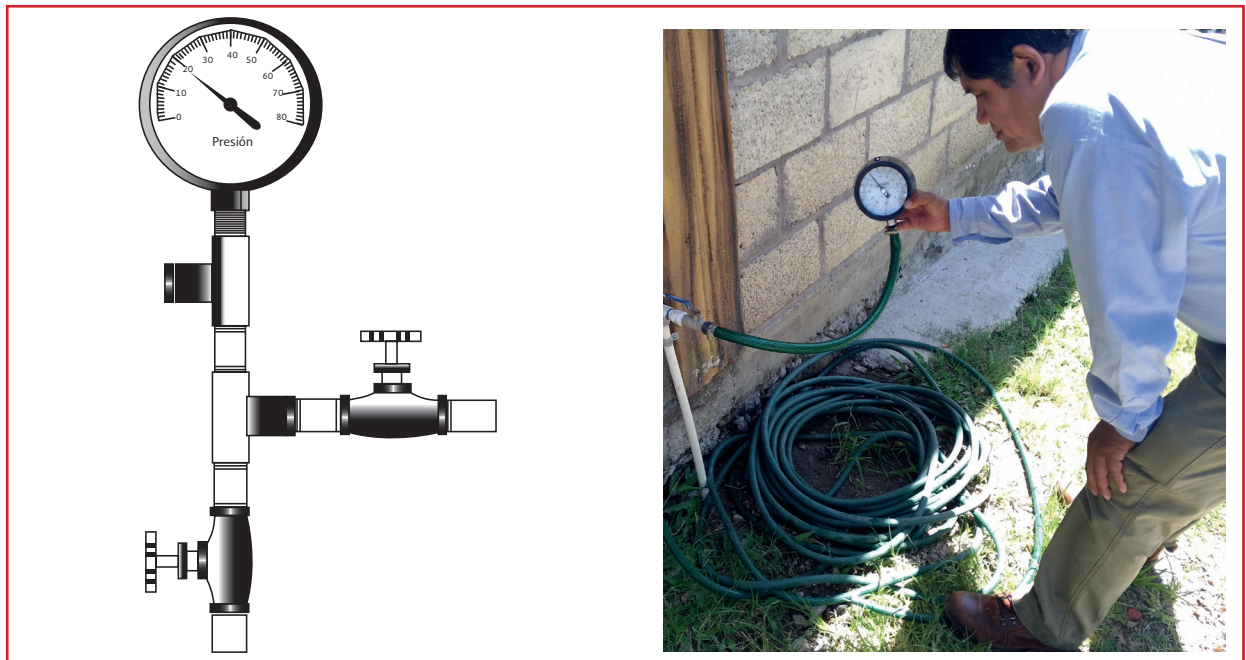
La ubicación de los puntos de medición de presiones se establece dibujando el plano de la red en ejes cartesianos y situando las coordenadas de cada punto de medición mediante números aleatorios simples en ambos ejes.

Por cuestiones prácticas y de seguridad, la medición de presiones se realiza durante el día, que es la condición de presiones bajas en la red. Por lo tanto, para efectos de ajuste del modelo de

Tabla 1.6 Descripción de la campaña de medición

Campaña de medición	Actividad	Objetivo	Equipo y herramientas
Hidráulica	Medición de presiones en la red	Ajustar el modelo de simulación hidráulica de la red y definir zonas críticas de alta y baja presión	Manómetro portátil tipo Bourdon, con conexión para toma domiciliaria
	Medición de caudales suministrados	Efectuar balances de agua y volumétrico y ajustar modelo de simulación hidráulica	Medidor ultrasónico o electromagnético portátil
	Medición de variación de la demanda de agua en la red	Obtener curva típica de variación de la demanda y coeficientes de variación horaria	Medidor ultrasónico o electromagnético portátil con "data-logger"
	Medición de errores de exactitud en macromedidores	Corregir los datos de volúmenes producidos y suministrados	Medidor ultrasónico o electromagnético certificado
	Muestreo de consumos de cuota fija	Estimar volumen unitario de consumo mensual y ajustar balance de agua y dotaciones	Formatos de campo
	Muestreo de errores de exactitud de micromedidores	Ajustar volumen medido facturado en el balance de agua y estimar el estado de exactitud de micromedidores	Bote de 20 litros certificado

Ilustración 1.1 Medición de presiones en la red



simulación hidráulica e interpretación de ocurrencia de fugas, es conveniente anotar la hora y el día en que se realiza la medición de presión en cada punto. Es recomendable realizar las mediciones de presión en horarios nocturnos.

Con respecto a los manómetros, será necesario adquirir aparatos que tengan las escalas apropiadas a las presiones esperadas en la red.

1.2.2. MEDICIÓN DE CAUDALES SUMINISTRADOS

La medición de caudales se realiza en cada una de las captaciones productoras de agua para la red, tales como pozos, manantiales, presas, galerías filtrantes, etc. Debe realizarse exactamente en la tubería donde ingresa el agua a la red de distribución. En los casos de potabilizadoras, tanques o rebombes, se debe medir el caudal justo a la salida de estas estructuras.

Es recomendable aprovechar los macromedidores instalados en el sistema de agua potable, siempre y cuando se obtengan previamente los errores de exactitud de estos equipos como se indica en las pruebas de la sección 1.2.4 de este libro. Cuando no exista macromedidor en la captación, se recomienda utilizar un medidor portátil del tipo ultrasónico o electromagnético, por su exactitud y por la versatilidad en su uso. Este medidor debe estar certificado por un laboratorio de pruebas acreditado (la cuál tiene vigencia de un año). La posición del medidor en la tubería de prueba debe ser en tramos rectos y preferentemente horizontales, y hay que asegurarse de que antes y después del medidor no existen obstáculos que distorsionen el perfil de velocidades del agua en la sección de prueba, como codos, válvulas, reducciones, ampliaciones, bombas, etcétera.

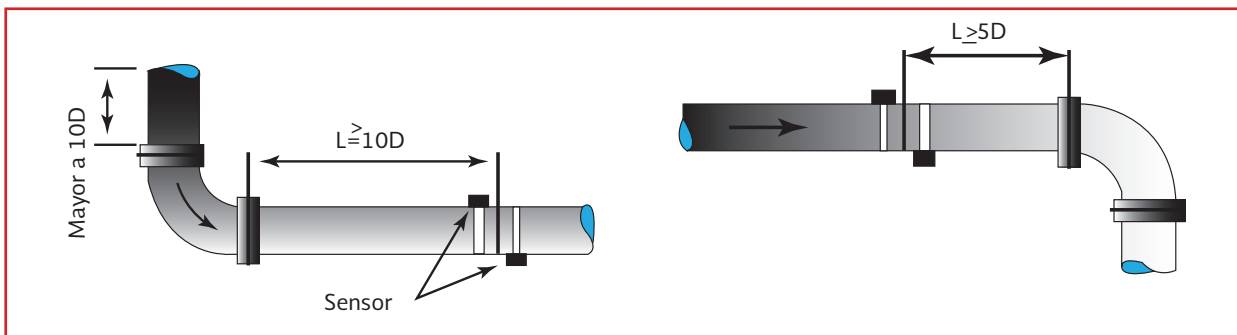
La distancia que se debe dejar equivale a 10 diámetros aguas arriba y 5 diámetros aguas abajo del eje del medidor (ver Ilustración 1.2).

Sin embargo, actualmente hay en el mercado medidores que pueden reducir estas distancias, las cuales se pueden consultar en los respectivos catálogos del fabricante.

Se podrá instalar el medidor en un conducto inclinado o vertical siempre y cuando lo permitan las especificaciones del fabricante y cuando se asegure que la tubería de pruebas está completamente llena en toda su sección. Para garantizar la medición adecuada, deberá evitarse colocar el medidor en aquellos tramos donde existan burbujas de aire o sólidos en suspensión.

La medición de caudal suministrado se efectúa en intervalos cortos; del orden de 15 a 30 minutos. Si no se detectan variaciones de caudal de ± 5 por ciento en el transcurso de un día, se considerará el valor registrado como el valor de gasto medio suministrado a la red por esta captación. En caso de que la fluctuación de caudal sea mayor a este porcentaje, se deben practicar pruebas continuas al menos durante 24 horas, con el fin de obtener un valor promedio de suministro de agua en ese punto.

Ilustración 1.2 Posición del medidor de caudal



1.2.3. MEDICIÓN DE VARIACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA EN LA RED

Para realizar la prueba de medición de variación de la demanda de agua en la red, se utilizará el macromedidor instalado o bien un medidor portátil, de acuerdo con las especificaciones y recomendaciones señaladas en la sección 1.2.2. La prueba durará 24 horas continuas y registrará el valor del caudal instantáneo en intervalos de 5 a 15 minutos, dependiendo del equipo. Se utilizará de preferencia un medidor que tenga *Data-Logger* integrado para evitar al máximo el error en la toma de lecturas y facilitar el procesamiento de datos. Con los datos registrados se elaborará la curva típica de demanda de agua de los usuarios, que, como ejemplo, se muestra en la gráfica de la Ilustración 1.3.

En la gráfica, el eje de las ordenadas corresponde al porcentaje del caudal medio suministrado (valor de 1.0), el cual se obtiene sumando los valores de caudal instantáneo, entre el número de valores registrados. En la curva de variación de la demanda de agua medida en campo, se iden-

tifica el valor máximo como el Coeficiente de Variación Horaria (valor de 2.17) y el valor mínimo como el Índice Mínimo Nocturno (valor de 0.29) de la zona de influencia de la captación donde se realizó la medición continua.

1.2.4. MEDICIÓN DE ERRORES DE EXACTITUD EN MACROMEDIDORES

Se debe descubrir y corregir cualquier error de medición en cada uno de los macromedidores instalados en las obras de abastecimiento. La prueba de error de exactitud en macromedidores se apoya en los procedimientos señalados en la Norma Oficial Mexicana NOM- 012-SCFI-1994 y puede realizarse con cualquiera de los siguientes procedimientos:

- Comparación de registros con un medidor portátil calibrado
- Prueba del medidor en un banco
- Comparación de registros con un segundo medidor calibrado e instalado en serie
- Sustitución del equipo por otro calibrado y comparación de registros

El método más rápido, práctico y económico es el de comparación de registros con un medidor

portátil calibrado (ver Ilustración 1.4). El punto exacto de colocación del equipo de medición portátil en la tubería de prueba deberá ajustarse a las especificaciones técnicas indicadas en la sección 1.2.2 de este libro.

La evaluación del error de exactitud (*Err*) se efectúa con la Ecuación 1.1.

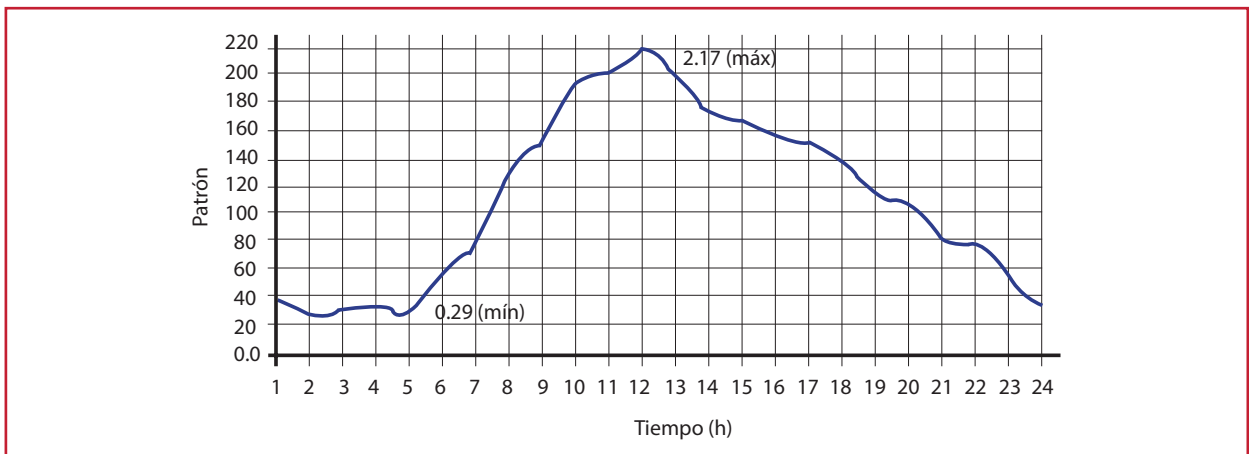
$$Err = \frac{(Q_{medidor} - Q_{patrón})}{Q_{patrón}} \times 100 \quad \text{Ecuación 1.1}$$

donde:

- Err* = error de exactitud (%)
- $Q_{medidor}$ = gasto instantáneo registrado en el macromedidor instalado (L/s)
- $Q_{patrón}$ = gasto instantáneo registrado en el medidor portátil (L/s)

La solución de esta ecuación arroja un valor en porcentaje negativo si el macromedidor instalado está midiendo de menos (submedición); por el contrario, un valor positivo indica que el macromedidor está midiendo de más (sobremedición). Por ejemplo, si el macromedidor instalado está registrando 100 L/s y el medidor patrón registra 104.72 L/s, el porcentaje medido y calculado resulta de -4.5 por ciento, quiere decir que hay submedición, en cambio sen cambio si

Ilustración 1.3 Curva típica de variación de la demanda de agua en una red de agua potable



el medidor patrón registra 93.72 L/s, quiere decir que hay sobremedición.

1.2.5. MUESTREO DE CONSUMOS DE CUOTA FIJA

Con la medición de consumos de cuota fija se determina si existe una asignación errada por parte del organismo operador en el volumen de consumo mensual de los usuarios que no tienen micromedidor (cuotas fijas). La prueba se realiza de tres maneras:

- Muestreo de consumos históricos de facturación en tomas con micromedidor
- Muestreo de registros de consumos en campo en micromedidores existentes
- Muestreo de registros de campo en micromedidores nuevos calibrados

Este último muestreo es el más fiable de los tres, pero el más costoso y con el que más tiempo se tarda. No obstante, los otros dos dan buenas aproximaciones para efectos de evaluación y diagnóstico.

1.2.5.1. Muestreo de consumos históricos de facturación en tomas con micromedidor

Del total de registros históricos de la facturación del organismo operador, se selecciona una muestra aleatoria de tomas domiciliarias que cuenten con micromedidor funcionando. Los consumos registrados de cada toma elegida en un periodo de un año se suman y se divide el resultado entre el número de datos del registro para obtener el consumo unitario promedio mensual ($m^3/toma/mes$). El consumo unitario global se obtiene con el promedio de todos los consumos unitarios de las tomas seleccionadas en la muestra, ver Ecuación 1.2.

$$Cu_{global} = \frac{\sum_{i=1}^{na} Cu_i}{na} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

donde:

Cu_{global} = consumo unitario global ($m^3/toma/mes$)

Cu_i = consumo unitario de cada toma i de la muestra ($m^3/toma/mes$)

na = tamaño de la muestra

Ilustración 1.4 Medición de error de exactitud en macromedidor instalado (color azul), con medidor portátil electromagnético de inserción



Para obtener una aproximación más certera de la prueba, se recomienda obtener una muestra de consumos por cada tipo de usuario. En el caso de usuarios domésticos es preferible una clasificación por clase socioeconómica (residencial, media, popular). Es necesario corregir los valores de consumos históricos registrados con el error de exactitud promedio de los micromedidores, el cual se obtiene en campo, como se indica en la sección 1.2.6.

Para obtener el tamaño de la muestra, se clasifica el universo de usuarios con micromedidor funcionando, de acuerdo con el tipo de usuario (doméstico, comercial, industrial, etc.). El total de usuarios de la muestra por cada tipo de usuario, se calcula con la Ecuación 1.3.

$$na = \left[\frac{Z_c^2}{Err_c^2} \right] S_c^2 \quad \text{Ecuación 1.3}$$

donde:

- na = tamaño de la muestra de usuarios con registros históricos en su micromedidor
- Z_c = valor de la abscisa de la curva de probabilidad normal estandarizada (1.96 para nivel de confianza del 95 %)
- Err_c = error esperado en la estimación del consumo unitario (m³/toma/mes)
- S_c = desviación estándar del consumo unitario histórico en usuarios con micromedidor (m³/toma/mes)

Se recomienda utilizar un error de estimación del orden del 5 por ciento sobre el promedio del consumo unitario por toma mensual. La desviación estándar se determina a partir de los consumos en un mes de usuarios con medición.

Por ejemplo, para un padrón de usuarios con micromedición funcionando de 78 347 tomas, con consumo doméstico promedio mensual igual a 32.64 m³/toma/mes, con una desviación estándar de 16.74 m³/toma/mes, y con un error de estimación (Err_c) de: $0.05 * 32.64 = 1.632$ m³/(toma/mes), se obtiene un tamaño de muestra de:

$$na = \left[\frac{1.96^2}{1.632^2} \right] 16.74^2 = 405 \text{ tomas}$$

Lo que quiere decir, entonces, que se deberán elegir 405 contratos del padrón de usuarios para realizar el análisis respectivo. Es importante mencionar que la selección de los elementos de la muestra debe ser hecha conforme a números aleatorios para evitar sesgos en los resultados.

1.2.5.2. Muestreo de registros de consumos en campo en micromedidores existentes

Del total de tomas domiciliarias con micromedidor funcionando, inscritas en el padrón de usuarios del organismo operador, se elige una muestra aleatoria determinada con la Ecuación 1.3. Cada uno de los elementos seleccionados se revisa en campo y se anotan los consumos cada semana durante un mes. Con estos datos se obtiene el consumo unitario promedio individual en cada toma domiciliaria de la muestra en m³/toma/mes. Con la Ecuación 1.2 se calcula el consumo unitario global promedio.

En este caso deberá practicarse una prueba en campo de error de exactitud de los micromedidores de la muestra, con el fin de corregir los valores registrados en el análisis. Esta prueba de exactitud se realizará de acuerdo con las especificaciones de la sección 1.2.6.

1.2.5.3. Muestreo de registros de campo en micromedidores nuevos calibrados

La actividad consiste en instalar una muestra de micromedidores nuevos y calibrados en tomas con cuota fija seleccionadas aleatoriamente y realizar en campo el registro de consumos semanalmente, durante un mes. Con los resultados se obtiene el consumo unitario promedio de cada toma domiciliaria de la muestra y aplicando la Ecuación 1.2 se determina el consumo unitario global promedio en m³/toma/mes.

El tamaño de la muestra se determina utilizando la Ecuación 1.3 y en este caso particular, *na* es el número de tomas domiciliarias que no cuentan con micromedidor (cuota fija) y *Sc* corresponde a la desviación estándar de los consumos históricos registrados por los usuarios que cuentan con micromedidor.

1.2.6. MUESTREO DE ERRORES DE EXACTITUD DE MICROMEDIDORES

La prueba de error de exactitud en micromedidores nuevos se realiza en bancos de prueba

acreditados, según los procedimientos marcados en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SC-FI-1994. El error de exactitud del micromedidor se calcula con la Ecuación 1.4.

$$Err_m = \frac{(Vol_{micr} - Vol_{patrón})}{Vol_{patrón}} \times 100 \quad \text{Ecuación 1.4}$$

donde:

Err_m = error de exactitud del micromedidor (%)

Vol_{micr} = volumen registrado por el micromedidor (L)

$Vol_{patrón}$ = volumen registrado en un recipiente certificado (L)

Cuando se trata de realizar pruebas de error de exactitud en micromedidores instalados en campo, la actividad de medición de exactitud de errores de micromedición consiste en elegir un micromedidor instalado y funcionando dentro del sistema de agua potable, realizarle una prueba comparativa en campo contra un recipiente certificado y calcular su error con la Ecuación 1.4.

Debido a que la cantidad de micromedidores en un sistema suele ser de varios miles, deter-

Ilustración 1.5 Equipo utilizado en pruebas de exactitud de micromedidores



minar el error de exactitud de micromedidores en forma individual no procede por razones de costo y tiempo. Por lo tanto, se realiza un muestreo estadístico, eligiendo aleatoriamente un grupo de aparatos de prueba. Con esto se busca obtener un error de exactitud representativo del total de la población que puede ser dado por tipo de usuario, marca de micromedidor, nivel de consumo, colonia, etc. El tamaño de la muestra na_{mic} se obtiene aplicando la Ecuación 1.5.

$$na_{mic} = \left(\frac{Z_c^2}{Err_{mic}^2} \right) (100 - \%_{mic}) \quad \text{Ecuación 1.5}$$

donde:

- na_{mic} = tamaño de la muestra
- Z_c = abscisa de la curva de probabilidad de distribución normal, para un nivel de confianza dado
- Err_{mic} = error esperado en la estimación (%)
- $\%_{mic}$ = porcentaje preestimado de micromedidores que tienen un error de exactitud fuera del límite máximo admisible ($\pm 2\%$)

El equipo utilizado para las pruebas de error de exactitud en micromedidores consiste en un recipiente certificado y un accesorio de conexión a la toma domiciliaria, como se observa en la Ilustración 1.5.

El recipiente está disponible en el mercado y está fabricado de acero inoxidable, tiene un volumen de 20 litros y cuenta con una escala graduada al decilitro, colocada cerca de un tubo transparente para visualizar el nivel del agua. En el esquema de la Ilustración 1.6 se muestran las dimensiones del recipiente de prueba.

La conexión para la toma domiciliaria se construye con materiales y accesorios comerciales, con una manguera conectada a una llave de paso y un cople roscado. Es recomendable instalarle un manómetro comercial tipo Bourdon y una llave de purga de aire.

La prueba de exactitud de micromedidores se realiza conforme a la NOM-012-SCFI-1994 (ver Ilustración 1.7), que establece como límites permisibles ± 5 por ciento en el campo inferior, comprendido entre el gasto mínimo q_{min} incluido y el gasto de transición qt

Ilustración 1.6 Recipiente para verificación de exactitud en micromedidores

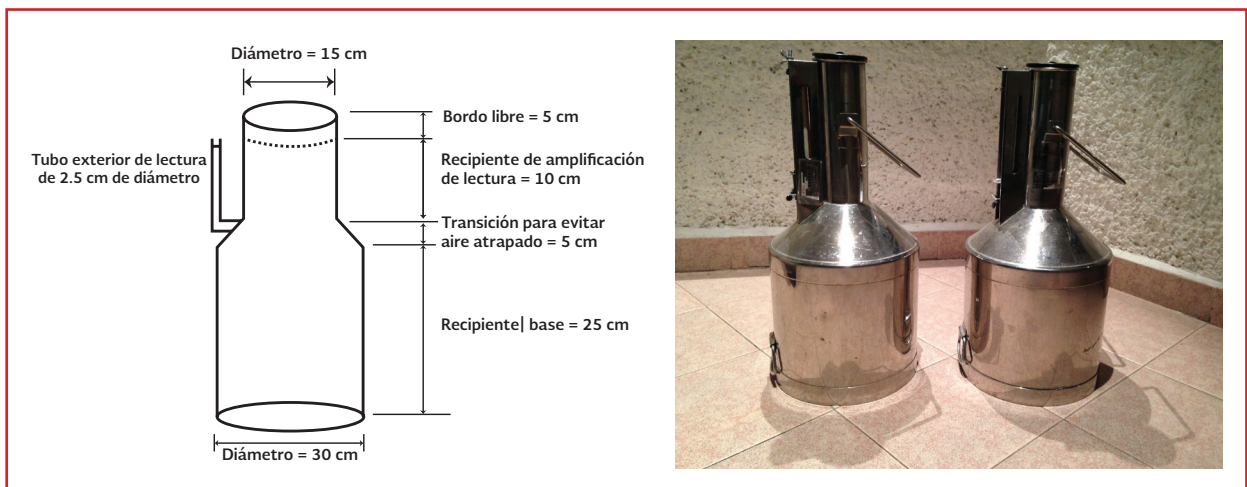


Ilustración 1.7 Prueba de campo de exactitud de medidores



excluido; y ± 2 por ciento en el campo superior, comprendido entre q_t incluido y el gasto de sobrecarga q_s incluido. Los gastos q_{min} y q_t dependen de la clase metrológica A, B y C, y de la designación del medidor N en m^3/h .

Conforme a la misma norma, el gasto permanente, q_p (m^3/h) se define como el gasto al cual se requiere que el medidor opere de manera satisfactoria bajo condiciones de flujo estable o intermitente, y que se determina con relación al valor numérico de la designación del medidor.

Asimismo gasto de sobrecarga q_s (m^3/h) definido como el gasto al cual se requiere que el medidor opere de manera satisfactoria por un corto periodo de tiempo sin deteriorarse; su valor es igual al doble del gasto permanente (observe la Tabla 1.7).

Como un dato útil, una cuadrilla formada por un ingeniero y su ayudante pueden realizar la

Tabla 1.7 Errores permisibles de acuerdo con el gasto estandar (NOM-012-SCFI-1994)

Campos	Error permisible	Gasto estándar referente (L/h)	
Campo inferior	$\pm 5\%$	Mínimo q_{min}	30
Campo superior	$\pm 2\%$	Transición q_t	120
		Permanente q_p	1 500
		Sobrecarga q_s	3 000

verificación de 5 a 6 micromedidores por día si la prueba se hace en los tres campos con la medida de 20 litros. Una vez realizadas todas las pruebas de campo en cada micromedidor seleccionado en la muestra, se realiza un análisis estadístico de la frecuencia del error, el error medio, la desviación estándar, entre otros, para establecer el valor representativo de la exactitud de la población total de micromedidores funcionando en un sistema de agua potable.

1.2.7. MUESTREO DE OCURRENCIA DE FUGAS

La evaluación de ocurrencia de fugas se realiza mediante un método estadístico (Arreguín y Ochoa, 1997), el cual permite estimar con suficiente aproximación y fiabilidad, la cantidad de agua perdida debido a fugas existentes en el sistema de distribución discriminadas en tomas domiciliarias, tubería y cajas de válvulas, así como también las variables físicas y de operación asociadas a dichas fugas, con lo cual se determinan los efectos y las causas del problema.

El método propone que las fugas sean estimadas como sigue:

1. Con estudios de campo se estiman los volúmenes perdidos por fugas en tomas domiciliarias ($Vol_{f_{td}}$) y el porcentaje de tomas que presentan fuga
2. El volumen de fugas de las tuberías principal y secundarias (Vol_{pft}) se calcula del balance de agua del sistema de abastecimiento (sección 2.1), restando los valores obtenidos de los estudios de campo de tomas domiciliarias, de los consumos ($Vol_{consumido}$) y del volumen entregado a la red ($Vol_{suministrado}$)
3. Para mejorar la estimación de los volúmenes de fugas en tubería de la red principal y secundaria, se resta el volumen de fugas de cajas de válvulas (Vol_{fcv}). Las fugas en cajas de válvulas se obtienen con otro estudio de campo

Para la aplicación del método es deseable que se cuente con un mínimo de información estadística en el sistema de agua potable, como: el porcentaje global de ocurrencia de fugas, el caudal promedio de fugas, la ocurrencia espacial

de fugas por colonias o sectores, presiones de la red, entre otras.

Cuando no se disponga de registros históricos de ocurrencia de fugas, se debe realizar un pre-muestreo de los reportes de las cuadrillas de reparación del organismo operador de, al menos, 15 días. Para ello se diseña un formato que contenga los datos de falla, lugar, elemento del sistema, caudal de la fuga, tipo de material del suelo y de la tubería, presión de la tubería donde ocurrió, etc. Los datos serán recolectados por las cuadrillas durante su trabajo.

1.2.7.1. Evaluación de fugas en tomas domiciliarias (Volna)

El porcentaje y volumen de agua perdida por fugas en tomas domiciliarias de una población Pob se calculan a partir de dos muestras aleatorias simples, cuyos tamaños son determinados en la teoría de muestreo estratificado.

Porcentaje de fugas en tomas domiciliarias

La primera muestra sirve para determinar el porcentaje de tomas domiciliarias que presentan fuga. Este porcentaje se determina a partir de observaciones en cada una de las tomas domiciliarias del estudio. Los resultados encontrados se contabilizan y se extrapolan a toda la población.

El tamaño de la muestra (na_0) se calcula usando la Ecuación 1.6.

$$na_0 = \left(\frac{Z_c^2}{Err_{\hat{n}}^2} \%_{0.\hat{n}} \right) (100 - \%_{0.\hat{n}}) \quad \text{Ecuación 1.6}$$

donde:

$$na_0 = \text{tamaño de la muestra}$$

Tabla 1.8 Costo del estudio con respecto al nivel de confianza esperado

Nivel de confianza (%)	Tamaño de muestra (tomas domiciliarias)	Costo del estudio (dólares estadounidenses)
70	108	3 240
75	132	3 960
80	163	4 890
85	207	6 210
90	272	8 210
95	384	11 520
99	676	20 280

Calculado de los datos de 15 ciudades estudiadas con un error en la estimación del 5% y porcentaje del 50%.

- Z_c = abscisa de la curva de probabilidad de distribución normal para un nivel de confianza dado
- Err_{ft} = Error esperado en la estimación (%)
- $\%_{ft}$ = Porcentaje de ocurrencia de fugas preestimado

El porcentaje de ocurrencia de fugas preestimado ($\%_{ft}$) se obtiene de los registros históricos. En el caso extremo de que sea prácticamente imposible determinar los porcentajes por la ausencia de estadísticas, se supondrá un valor de ocurrencia de fugas en tomas domiciliarias del 25 por ciento y se ajustará conforme se obtengan los resultados de las inspecciones en campo.

El error en la estimación (Err_{ft}) representa la máxima diferencia entre el porcentaje de fugas obtenido en la muestra y el porcentaje esperado: a menor error en la estimación, el valor esperado es más cercano al estimado estadísticamente, y viceversa. Un valor recomendado del error en la estimación es cinco por ciento.

El nivel de confianza se establece de acuerdo con la disponibilidad de recursos y en función de las necesidades de precisión estadística deseada. Un análisis de sensibilidad, derivado de la información de 15 ciudades donde se aplicó el

método, permitió determinar que el incremento en costo del estudio al aumentar el nivel de confianza de 95 por ciento a 99 por ciento, es del orden del 80 por ciento, como se muestra en la Tabla 1.8.

Es necesario asegurar que el tamaño de la muestra tenga un mínimo de 30 tomas domiciliarias a observar (Des Raj, 1992); las muestras con menos elementos deben ser tratadas como muestras pequeñas.

Cuando el tamaño de la muestra (na_0) sea más grande que el 5 por ciento del número total de tomas domiciliarias conectadas al sistema de distribución (N), el tamaño de la muestra (na_0) debe ser corregido mediante la Ecuación 1.7.

$$na_{0corr} = \frac{na_0}{1 + \left(\frac{na_0}{N}\right)} \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Una vez determinado el tamaño de la muestra, se seleccionan las tomas domiciliarias que se estudiarán en campo a partir de números aleatorios del listado de usuarios del sistema de agua potable. El trabajo de campo consiste en inspeccionar la existencia de fugas en las tomas domiciliarias seleccionadas. Esta inspección física de tomas domiciliarias se lleva a cabo con base en

los métodos de detección de fugas por caída de presión diferencial o por sonido.

Para confirmar la existencia de fugas, se procede a hacer una excavación en la toma domiciliaria en cuestión. Para cada toma, se asigna un valor de 1 si aparece con fuga, y en caso contrario, un valor de cero (como fuga se considera cualquier escape de agua, desde la inserción de la toma hasta el micromedidor).

El porcentaje de fugas se obtiene dividiendo el número de tomas domiciliarias encontradas con fuga entre el tamaño de muestra. Después, este valor se extrapola hacia el total de tomas domiciliarias de la ciudad, multiplicando el porcentaje de tomas domiciliarias con fuga determinado con la muestra por el número de tomas conectadas en el sistema de agua potable.

Volumen de fugas en tomas domiciliarias

La segunda muestra sirve para calcular el volumen de agua perdida por fugas en las tomas domiciliarias. El tamaño de la muestra (na_q) se calcula utilizando la ecuación 1.8 (Spiegel, 1991).

$$na_q = \frac{Z_c^2}{Err_q^2} S_{q_i}^2 \quad \text{Ecuación 1.8}$$

donde:

- na_q = tamaño de la muestra
- Z_c = abscisa de la curva de probabilidad de distribución normal para un nivel de confianza dado
- S_{q_i} = desviación estándar del gasto de fuga en tomas domiciliarias (mL/s)
- Err_q error esperado en la estimación del caudal unitario de fugas en tomas domiciliarias (mL/s)

Si no se cuenta con antecedentes estadísticos (se desconoce cuál es la desviación estándar del gasto de fugas, S_{q_i}). En estos casos, la desviación estándar se puede estimar a partir del aforo de las fugas encontradas durante la inspección de ocurrencia. La Ecuación 1.8 se deberá entonces ir ajustando conforme se vayan realizando los aforos subsecuentes.

El trabajo de campo consiste en aforar las fugas que se presentan en las tomas domiciliarias inspeccionadas en el primer muestreo. El aforo de fugas se realiza colocando un recipiente calibrado a un volumen establecido y midiendo el tiempo en que se llena. El gasto de las fugas será el volumen dividido entre el tiempo respectivo. La prueba se repite tres veces para evitar errores.

Los caudales unitarios de fuga (Q_{q_i}), determinados a partir de las mediciones en las tomas domiciliarias, se promedian y se multiplican por el total de tomas domiciliarias con fuga del primer estudio de campo y por el periodo de análisis y de permanencia de la fugas. Este valor es el total de volumen de fugas en tomas domiciliarias del sistema de agua potable (Vol_{fnd}) en el periodo establecido para el análisis.

Si el suministro de agua es intermitente en algunas porciones de la ciudad, el volumen de fugas de tomas domiciliarias se modifica multiplicando las pérdidas de cada zona de tandeo por el periodo en que el agua es suministrada.

Para interpretar las posibles causas del problema, sumado a los valores de volúmenes de pérdidas durante el aforo de las fugas, se hace un reporte de las variables físicas donde se presentó dicha fuga (material de la tubería, tipo de falla, suelo, profundidad, etc.). Todos los registros de

campo de las mediciones deberán presentarse en formatos similares al mostrado en la Tabla A.9 del Anexo.

1.2.7.2. Evaluación de fugas en cajas de válvulas

La estimación del volumen de fugas en cajas de válvulas (Vol_{fcv}) se realiza a través de dos muestreos aleatorios simples con inspecciones y aforos en campo de ocurrencia de fugas. Para obtener el porcentaje de cajas de válvulas que tienen fuga y estimar el caudal unitario promedio de las fugas, las muestras de cajas de válvulas na_v y na_{qv} se calculan con las Ecuación 1.9 y Ecuación 1.10, respectivamente.

$$na_v = \frac{Z_c^2}{Err_{fv}^2} \%_{fv} (100 - \%_{fv}) \quad \text{Ecuación 1.9}$$

donde:

- na_v = tamaño de la muestra
- Z_c = abscisa de la curva de probabilidad de distribución normal para un nivel de confianza dado
- Err_{fv} = error esperado en la estimación, en el porcentaje de cajas de válvulas con fugas
- $\%_{fv}$ = ocurrencia de fugas en cajas de válvulas (%)

$$na_{qv} = \frac{Z_c^2}{Err_{qv}^2} S_{qv}^2 \quad \text{Ecuación 1.10}$$

donde:

- na_{qv} = tamaño de la muestra

- Z_c = abscisa de la curva de probabilidad de distribución normal para un nivel de confianza dado
- S_{qv} = desviación estándar del gasto de fuga en cajas de válvulas (mL/s)
- Err_{qv} = error esperado en la estimación del caudal unitario de fugas en cajas de válvulas (mL/s)

Para poblaciones pequeñas, los tamaños de las muestras deben ajustarse con la Ecuación 1.7; no obstante, el número de cajas de válvulas por inspeccionar será igual o mayor a 30 elementos, con el fin de garantizar que sea una muestra grande.

Una vez calculado el número de cajas de válvulas por inspeccionar, se eligen aleatoriamente consultando un plano de la red. En este plano se ubican todas las cajas del sistema de agua potable y se trazan ejes cartesianos (x,y); entonces se elige una pareja de números aleatorios que corresponderán con las coordenadas respectivas de la caja seleccionada.

Tras identificar en el plano cada una de las cajas de válvulas de la muestra, se procede de manera similar al muestreo de tomas domiciliarias para calcular el volumen total de fugas en cajas de válvulas en la ciudad. Los trabajos de campo se realizan según lo indicado en la sección 1.2.8.

1.2.7.3. Evaluación de fugas en tubería de la red principal y secundaria

Para estimar el volumen de las fugas en tubería principal y secundaria se aplica un balance de agua, según lo indicado en la sección 2.1.

Ilustración 1.8 Ficha técnica tipo de inspección de caja de válvulas

Calles: Av. Mar del norte Esq. Av. Diana Laura Riojas			
Colonia: Guymas norte			
No. de cruce: 1			
No. de tapas: 1	No. de válvulas		
Referencias:			
		Croquis de localización	
La caja se encontraba azolvada por: Tierra		Basura	Inundada
Características de la válvula		Características de la válvula	
Diámetro (pulgadas) 6"		Diámetro (pulgadas) 4"	
Tipo de vástago: fijo de cuadro		Tipo de vástago: válvula reguladora de presión	
Comentarios: válvula completamente abierta		Comentarios: calibrada a 15 PSI	
Observaciones generales: La tubería de 6" suministra agua a las colonias Las Torres y Maquillas			

1.2.8. LEVANTAMIENTO DE CAJAS DE VÁLVULAS

El trabajo físico del levantamiento de cajas de válvulas es una actividad que tiene varios objetivos: complementar la actualización de los planos de la red de distribución de agua, evaluar el estado de las cajas y detectar fugas en los estoperos, volantes y juntas de las válvulas.

Es necesario en cualquiera de los casos mencionados, antes de iniciar el trabajo de campo, disponer de un formato que contenga los espacios suficientes para anotar su ubicación geográfica, el croquis de localización y su detalle de fontanería; datos de su estado, diámetros, y dos fotografías de la válvula, una de lejos y una de cerca. Se digitaliza en un plano toda la información y se forman fichas por cada una de las cajas de

Tabla 1.9 Resumen de inspección de cajas de válvulas

Resumen de condición del interior de las cajas de válvulas		
Condición	Cantidad	Porcentaje
Tierra	48	65%
Basura	3	4%
Inundada	6	8%
Buen estado	17	23%
Total	74	100%
Resumen de condición de las losas y las tapas en las cajas de válvulas		
Condición	Cantidad	Porcentaje
Daño en losa	0	0%
Sin losa	0	0%
Sin tapa	2	3%
Tapa soldada	0	0%
Tapa sin fijación	6	8%
Buen estado	66	89%
Total	74	100%

válvulas inspeccionadas. La Ilustración 1.8 presenta una ficha tipo de caja de válvula inspeccionada en campo.

El trabajo de campo consiste en ubicar la caja por inspeccionar, destaparla y registrar los datos respectivos. En caso de que se encuentre azolvada o inundada será necesaria su limpieza, pero se deberá tomar nota de esta situación en los formatos correspondientes. Una cuadrilla formada por un ingeniero y un ayudante pueden realizar la inspección de unas 20 cajas diarias.

Es recomendable también, realizar un resumen analítico de resultados globales formando cuadros como los mostrados en la Tabla 1.9.

Con estos resultados es posible determinar las inversiones para limpieza, sustitución o rehabilitación, cambios de tapas, etc., y valorar el gasto unitario de fugas promedio, así como su porcentaje de ocurrencia.

1.2.9. LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS

Para efectos del análisis hidráulico del sistema de agua potable en los proyectos de eficiencia, es determinante conocer la elevación de la tubería, captaciones, tanques de regulación y rebombes, ya que un error de un metro en la cota topográfica del nivel del agua en un tanque, puede cambiar sustancialmente los parámetros de velocidad y presión en la red. Por lo cual, es necesario revisar y actualizar la topografía de la ciudad en estudio con el levantamiento topográfico.

El levantamiento topográfico comienza por el análisis de los planos existentes para identificar la cantidad de información con la que se cuenta y definir los trabajos complementarios de campo. Normalmente, los datos de topografía que interesa determinar para realizar estos proyectos de eficiencia son las cotas de los cruces de

la red de distribución, cotas de desplante de los pozos y tanques de regulación, y los perfiles de las líneas de conducción existentes.

Antes de proceder a ejecutar trabajos de campo de topografía, es recomendable consultar la base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), también se puede consultar a los institutos de Información Estadística, Geográfica y Catastral, en los estados que lo tengan.

Los trabajos de campo de topografía, de cruces, cotas de tanques y pozos así como los perfiles de conducciones se ejecutan según las especificaciones definidas en el libro *Estudios Técnicos Para Proyectos de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Topografía y Mecánica de Suelos*, del MAPAS.

Es importante mencionar que actualmente existen en el mercado equipos comerciales para obtener los datos topográficos de las estructuras y cruces de la red de distribución de agua potable, entre ellos, La Estación Total (ET) y el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Estos equipos versátiles permiten descargar los valores levantados en campo directamente a planos digitales o bases de datos (*shapefiles*).

1.2.10. VINCULACIÓN DE TOMAS DOMICILIARIAS

La vinculación de tomas domiciliarias tiene por objeto detectar irregularidades en el padrón de usuarios del organismo operador del sistema de agua potable. Las irregularidades se refieren a las diferencias que existen entre lo que describe el contrato del usuario con lo que se encuentra físicamente en el lugar de la toma domiciliaria, como puede ser: usos de agua distintos a los

registrados en el padrón de usuarios, equivocación en la existencia de micromedidor funcionando, nombre del usuario sin actualizar en tomas domiciliarias inactivas, usos fraudulentos y clandestinos.

La vinculación de tomas domiciliarias comienza con la selección de rutas de recorrido. Para ello, conviene aplicar los mismos recorridos que se realizan durante la toma de lecturas de consumos. De hecho, esta información normalmente tiene cierta correspondencia con el listado de los usuarios del padrón. En la Ilustración 1.9 se muestra un croquis típico de recorrido para la vinculación de tomas domiciliarias.

Después de definir las rutas, se prepara un formato de encuesta a los usuarios y revisión de la toma domiciliaria. Hay que corroborar el nombre del usuario, la existencia de varias tomas domiciliarias en un mismo predio, el giro del inmueble, el estado físico del micromedidor, la correspondencia con el número de contrato y serie catastral, la existencia de fugas, la posibilidad de un fraude o clandestinaje y la satisfacción del usuario con el servicio de agua, entre otros. El formato puede ser preparado según convenga en cada estudio. En la Tabla A.10 del Anexo A se muestra un ejemplo de estos formatos.

El procedimiento de campo para realizar las encuestas y verificaciones no sigue alguna norma específica, por lo que cada quien definirá su propia estrategia de actuación. No obstante, proponemos algunas recomendaciones útiles:

1. Realizar recorridos siguiendo rutas dentro de una misma área o zona. Evitar recorridos dispersos ya que disminuyen los rendimientos de la actividad

Ilustración 1.9 Croquis típico de recorrido para vinculación de tomas domiciliarias



2. Los encuestadores deben portar un gafete y al menos una playera con logotipos oficiales del organismo operador para facilitar las labores y evitar la desconfianza de los usuarios
3. Evitar que dos encuestadores se dividan una ruta para asegurar que se realice al 100 por ciento y no exista duda alguna de los datos
4. Estandarizar los criterios de detalles sobre claves de identificación, marca y modelo de micromedidores, diámetro de las tomas, longitudes, usos del servicio de agua, entre otros
5. Las rutas de recorrido deberán ser del orden de 500 predios como máximo con el fin de tener mejor control de la supervisión de la actividad

La experiencia en esta actividad indica que una persona puede revisar adecuadamente alrededor de 70 predios por día en zonas de clase media y popular. En zonas residenciales el rendimiento disminuye un 25 por ciento debido a la baja densidad de las viviendas. En zonas marginadas el rendimiento disminuye hasta un 40 por ciento debido a la traza urbana irregular en estas zonas y a la gran cantidad de asentamientos dispersos.

Paralelamente al levantamiento de encuestas se realiza la actividad de captura de datos en formato digital, con la intención de facilitar su análisis y actualización posterior. Actualmente, existe una tecnología comercial denominada Sistema de Información Geográfica (SIG), que permite disponer de bases de datos ligadas

al plano catastral de la población, incluso se encuentran georeferenciados a un sistema de coordenadas universal. Por lo tanto, es recomendable que se utilicen estas tecnologías para la captura de datos de la vinculación de las tomas domiciliarias.

1.2.11. MEDICIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS E HIDRÁULICOS EN EQUIPOS DE BOMBEO

Para realizar el diagnóstico de una instalación electromecánica en los sistemas de agua, es indispensable la medición de parámetros tanto hidráulicos como eléctricos. Con base en el resultado de esas mediciones se determina:

- La eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba y en forma separada
- La curva de comportamiento carga-gasto-eficiencia del equipo de bombeo

Para que las mediciones sean lo más reales posible y, por ende, los valores de eficiencia sean veraces, se debe procurar:

- Que los equipos de medición estén calibrados y en buenas condiciones de operación
- El sistema a medir se encuentre en estado estable, sin perturbaciones que motiven una medición falsa

1.2.11.1. Medición de parámetros eléctricos

Los parámetros eléctricos a medir son:

- Tensión eléctrica (voltaje)
- Corriente eléctrica

- Factor de potencia
- Potencia real o activa
- Potencia reactiva

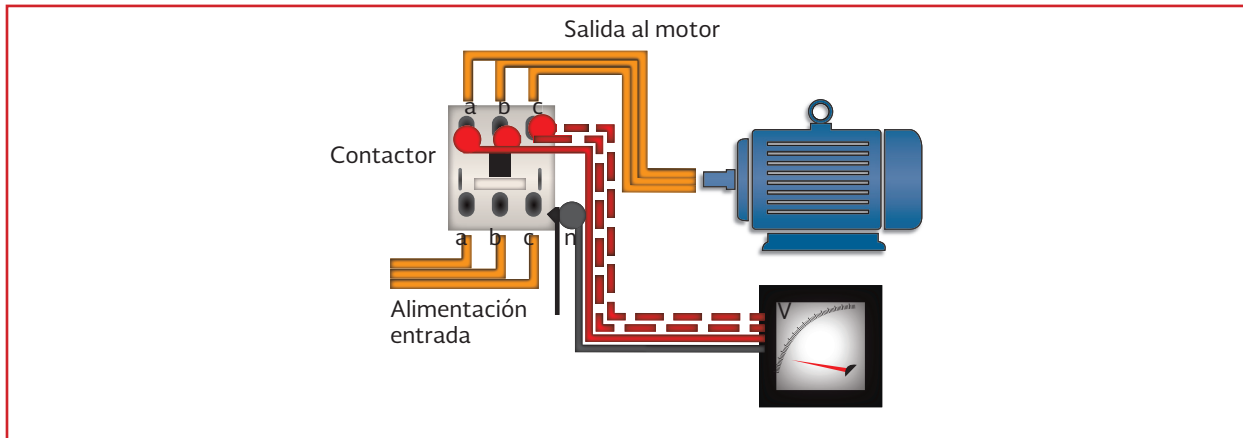
En estos casos es indispensable la utilización de equipo de medición adecuado: voltímetro, amperímetro, wattímetro, multímetro, etc. Para simplificar el proceso de medición, se recomienda utilizar un analizador de redes eléctricas que permita la medición de parámetros por fases, integrar dichas mediciones para obtener directamente los valores trifásicos, almacenar en memoria información para obtener tendencias y en la mayoría de los casos, medir otros parámetros eléctricos que son importantes para evaluar la calidad de la energía utilizada en el equipo, como la distorsión armónica, entre otros.

Medición de tensión eléctrica (voltaje)

Para realizar la medición de la tensión eléctrica en equipos de bombeo, es necesaria la utilización de un voltímetro. Proceder de la siguiente manera, teniendo como referencia la Ilustración 1.10:

1. Realizar la medición en los cables de tensión eléctrica que salen del contactor hacia el motor de la bomba
2. Colocar el cable rojo del voltímetro sobre la punta de salida del contactor en la línea “a”
3. Colocar el cable negro del voltímetro sobre la punta de tierra “n”
4. Registrar la lectura de tensión (V_{an}), correspondiente a la fase “a”
5. Repetir la acción, colocando el cable rojo del voltímetro en la punta de salida “b” y “c” del contactor (con el negro a tierra) y tomar lecturas respectivas de tensión (V_{bn}) en fase “b” y tensión (V_{cn}) en fase “c”

Ilustración 1.10 Medición de tensión (voltaje) en equipos de bombeo



6. En el caso de la medición de tensión eléctrica entre fases, se debe repetir el procedimiento anterior colocando a la salida del contactor el cable rojo del voltímetro en la punta “a” y el cable negro en la punta “b”; después entre “a” y “c”; por último entre “b” y “c”

Con el promedio de estos tres valores se calcula el valor de la tensión eléctrica trifásica (V). Se recomienda realizar tres lecturas en cada cable para corroborar los datos.

Para la medición de los parámetros hidráulicos se deberán tener los equipos de medición calibrados y en buenas condiciones de uso. Asimismo, al efectuar las mediciones, el sistema no debe tener perturbaciones. En el caso de instalaciones unitarias, como pozos o equipo de rebombeo, las mediciones se hacen directamente en el tren de descarga. Para las instalaciones que integran a varios equipos de bombeo, se deben realizar las mediciones de los parámetros hidráulicos individualmente sobre su tubería de descarga.

La curva gasto de funcionamiento vs carga hidráulica total de bombeo ($Q-H_b$) se construye realizando mediciones de estos dos parámetros,

modificando en cada lectura de datos las condiciones de operación.

Los parámetros hidráulicos y los datos de referencia que se deben obtener son los siguientes:

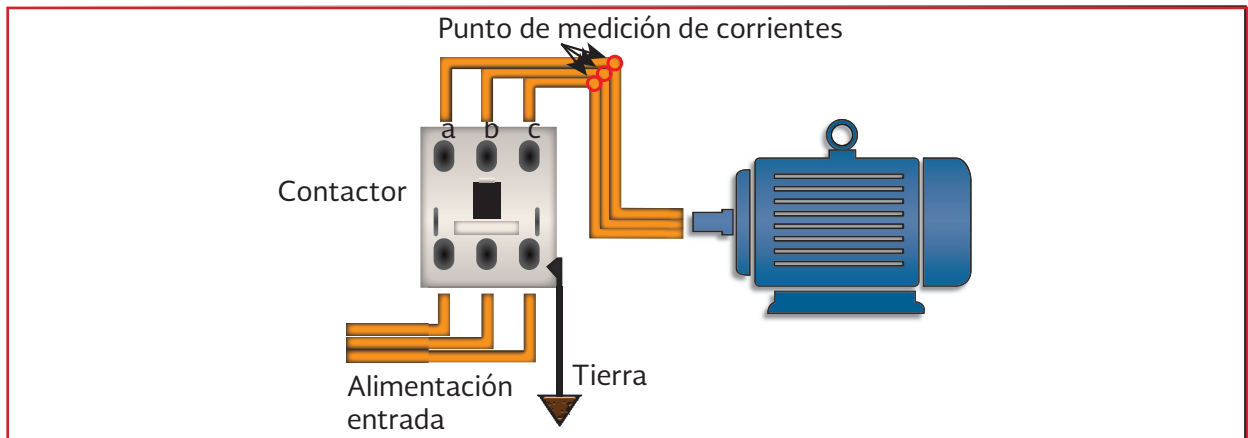
- Medición del caudal a la descarga en la bomba (Q)
- Medición de la carga de presión de operación, en la succión (p_s) y descarga (p_d)
- Definición del nivel de referencia (pN_r)
- Medición del nivel dinámico de succión (ND_s)
- Medición de niveles a centros de manómetros ($Dr-m$), tanto en la succión como en la descarga según el caso explicado más adelante

Medición de corriente eléctrica

La medición de la corriente eléctrica se efectúa con un amperímetro. El procedimiento de medición se efectúa de la manera siguiente (Ilustración 1.11):

- a) Cuando se utiliza un amperímetro monofásico, las lecturas de corriente eléctrica se realizan una por una, colocándolo

Ilustración 1.11 Medición de corriente eléctrica en equipos de bombeo



en cada uno de los tres cables que salen del contactor y que alimentan al motor. Las lecturas, registradas en cada cable, serán de las corrientes de las fases I_a , I_b , I_c , respectivamente. Con estos tres valores se calcula la corriente promedio de fases que es la corriente eléctrica trifásica total (I_{tr}). Se recomienda realizar tres lecturas en cada cable para corroborar los datos

- b) En caso de utilizar un analizador de redes, no será necesario realizar las lecturas de corriente eléctrica en forma individual, sino colocar los tres amperímetros simultáneamente en cada uno de los cables que salen del contactor y alimentan al motor. Así, las lecturas de las corrientes eléctricas de cada cable se obtiene directamente en la pantalla del analizador

Medición del factor de potencia y cálculo de la potencia eléctrica

La medición del factor de potencia (FP) se puede realizar de la misma manera que la medición de corriente o la de tensión, usando además una resistencia similar a la que tienen las parrillas eléctricas. Este método es muy práctico ya que en ocasiones no se

dispone de un wathorímetro. De esta forma, el valor del factor de potencia se obtiene utilizando solo el amperímetro o el voltímetro y aplicando las fórmulas matemáticas de ley de los senos y cosenos.

Medición del factor de potencia con amperímetro

1. Conectar en paralelo la resistencia con la carga de la cual se quiere medir el factor de potencia (puede ser un motor) como se observa en la Ilustración 1.12. La relación de corrientes se representa de acuerdo con la relación de ángulos que se muestra en la Ilustración 1.13

Ilustración 1.12 Medición del factor de potencia con amperímetro

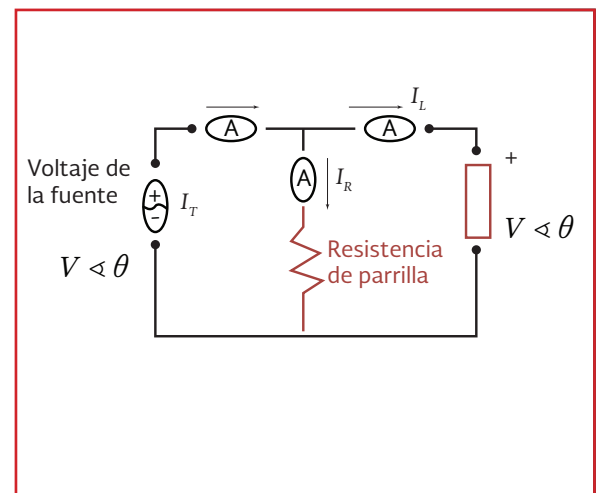
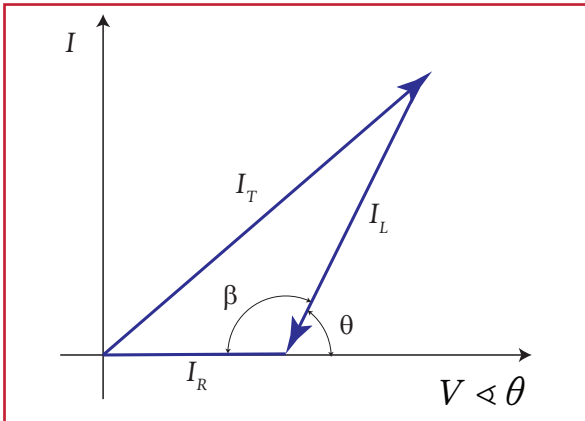


Ilustración 1.13 Relación de corrientes de acuerdo con la relación de ángulos



2. Anotar los valores de la corriente que se obtiene de la fuente (I_{Total} o I_T), la corriente que pasa por la resistencia (I_R) y la corriente que pasa por la carga (I_{Load} o I_L)
3. Posteriormente se calcula el factor de potencia (FP) o $\text{Cos } \theta$ resolviendo el problema como un análisis vectorial y aplicando las leyes de Kirchoff, suponiendo que el ángulo del voltaje es cero y calculando el ángulo θ de la forma siguiente: como ya se conocen las magnitudes I_L , I_T , I_R , se calcula el ángulo β mediante la Ecuación 1.11

$$\text{Cos}\beta = \frac{I_R^2 + I_L^2 + I_T^2}{2I_R I_L} \quad \text{Ecuación 1.11}$$

por lo tanto:

$$\theta = 180 - \beta$$

$$FP = \text{Cos}(180 - \beta)$$

Medición del factor de potencia con un voltímetro

Este método es similar al visto anteriormente pero ahora con un voltímetro y un circuito en serie y suponiendo que la corriente tiene un

ángulo de cero, como se muestra en la Ilustración 1.14. La relación angular se muestra en la Ilustración 1.15.

Similar al método anterior con valores de corriente, los pasos a seguir son:

1. Anotar los valores del voltaje que entrega la fuente (V_T), el voltaje que pasa por la resistencia (V_R) y el que pasa por la carga (V_L)
2. Posteriormente se resuelve el problema como un análisis vectorial y aplicando las leyes de Kirchoff suponiendo que el ángulo de la corriente es cero y calculando el ángulo θ , de la forma siguiente
Como ya se conocen las magnitudes V_L , V_T , V_R se calcula el ángulo β mediante la Ecuación 1.12:

$$\text{Cos}\beta = \frac{V_R^2 + V_L^2 + V_T^2}{2V_R V_L} \quad \text{Ecuación 1.12}$$

por tanto:

$$\theta = 180 - \beta$$

$$FP = \text{Cos}(180 - \beta)$$

3. Con el valor de FP , la corriente eléctrica y la tensión eléctrica medida anteriormente, se puede calcular la potencia activa (P_a) utilizando la Ecuación 1.13

$$P_a(\text{Watts}) = VI_u \text{Cos}(180 - \beta) \quad \text{Ecuación 1.13}$$

Potencia real o activa

Para medir la potencia real se utiliza un wattímetro, que se coloca a la salida del contactor en los cables que van hacia el motor. El procedimiento para realizar la medición del

valor de la potencia real o activa es el siguiente:

1. Se colocan las terminales de voltaje del wathorímetro sobre el cable de la fase “a”
2. Enseguida se coloca la otra terminal de voltaje del wathorímetro en el cable neutro “n”
3. Se inserta el gancho del amperímetro en el cable de la fase “a”
4. Se registra la lectura de la potencia real o activa directamente en el wathorímetro
5. Se repite el proceso anterior para obtener la potencia real en las fases “b” y “c”

Si el equipo de bombeo tiene instalado un banco de capacitores, se sugiere hacer dos mediciones, ver Ilustración 1.16 e Ilustración 1.17:

1. La primera de ellas se debe realizar corriente abajo del punto de conexión del banco de capacitores, en los conductores que van directamente a la bomba sumergible o al motor en bombas verticales de flecha, con el objeto de que las mediciones no se vean influidas por el efecto de compensación de los capacitores y reflejen la situación real del motor eléctrico que se está evaluando

Ilustración 1.14 Medición del factor de potencia con voltímetro

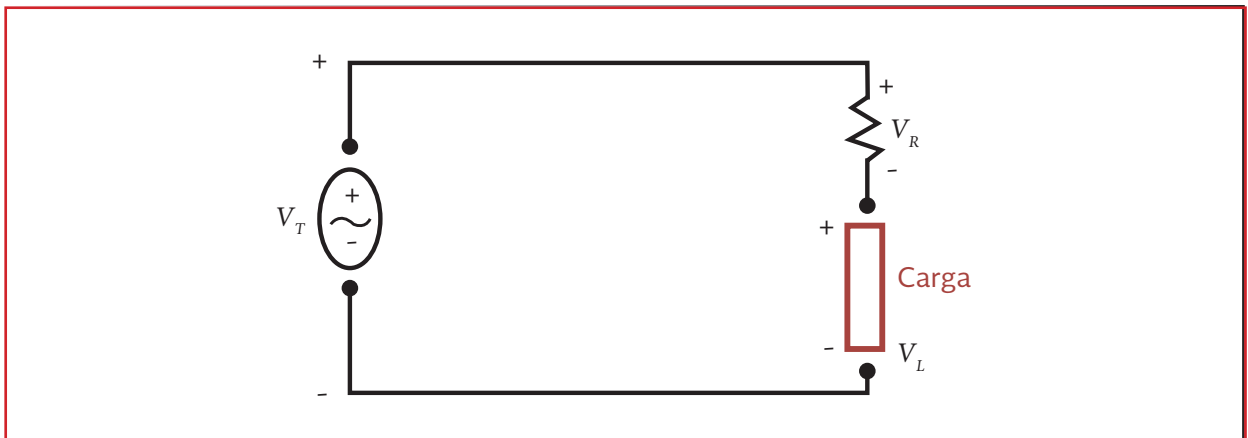
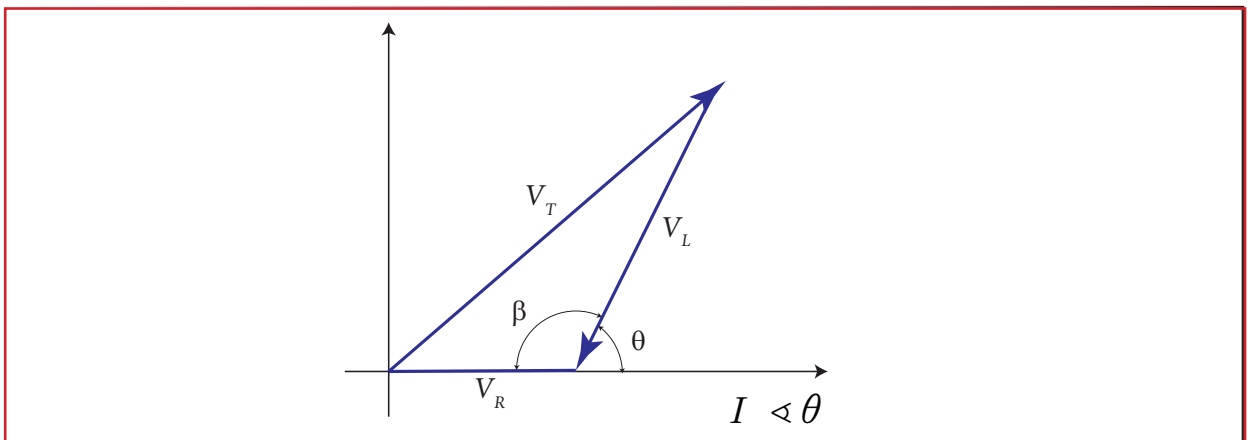


Ilustración 1.15 Relación de voltajes de acuerdo con la relación de ángulos



2. La segunda medición debe realizarse corriente arriba del capacitor. Esta medición describirá el efecto de la compensación del factor de potencia sobre la red eléctrica

1.2.11.2. Medición de parámetros hidráulicos

Medición del caudal a la descarga de la bomba

Para la medición del caudal (Q_d) debe seguirse la metodología y recomendaciones expuestas en el punto 1.2.2. En el caso de instalaciones electromecánicas con una batería de varios equipos,

como los rebombes, la medición de caudal debe hacerse individualmente en cada equipo, cuidando que se encuentre en la condición de operación más estable, con el fin de evaluar la situación energética en las condiciones comunes de operación.

Medición de cargas de presión de succión y descarga

Para realizar las mediciones de las cargas de presión de succión (p_s) y descarga (p_d), se recomienda el uso de manómetros tipo Bourdon, de preferencia los que contienen glicerina. Hay que asegurar su buena calibración y que se use en el tercio medio de su escala, puesto que es donde

Ilustración 1.16 Medición de la potencia real antes de los capacitores

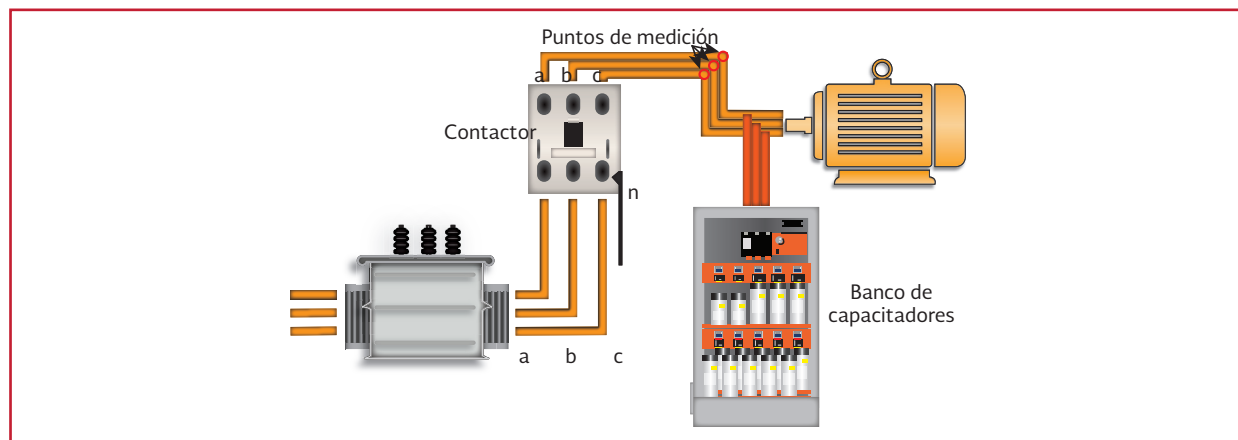


Ilustración 1.17 Medición de la potencia real después de los capacitores

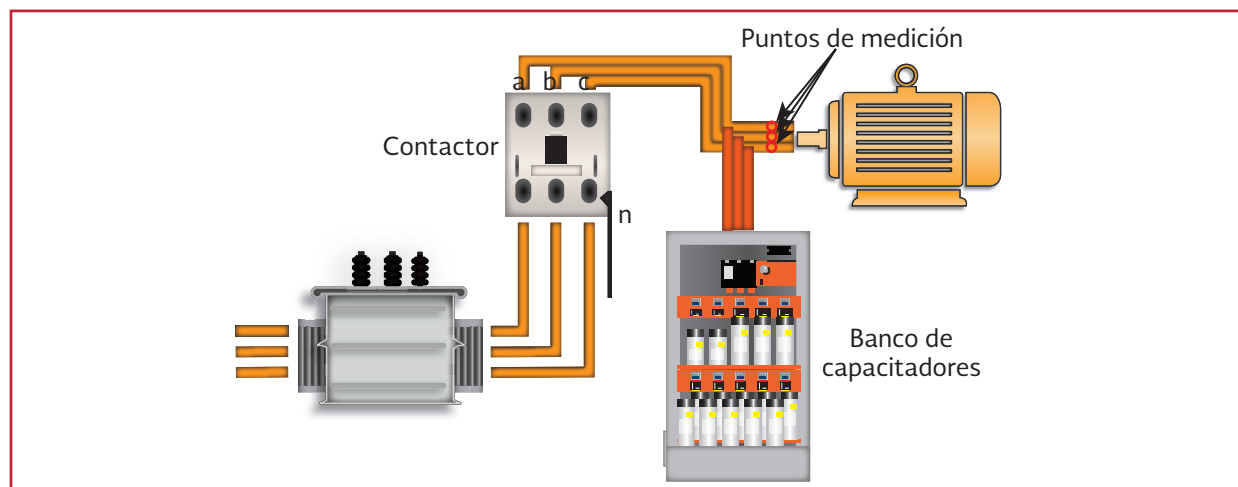


Ilustración 1.18 Medición de presión con manómetro tipo Bourdon calibrado



su exactitud es la óptima. La manera de realizar la medición se muestra en las imágenes de la Ilustración 1.18.

Para efectos prácticos, en los cálculos es recomendable expresar la presión en carga piezométrica, en metros, aunque los manómetros suelen tener escalas de kg/cm^2 o $\text{lb}/\text{pulgada}^2$. Las equivalencias de estas unidades son las siguientes:

$$\text{kg}/\text{cm}^2 = 10\text{m}$$

$$\frac{\text{lb}}{\text{pulgada}^2} = 0.7031\text{m}$$

Las mediciones de presión de succión y descarga deberán hacerse lo más cerca de la bomba. En caso de que no sea posible hacer la medición en la succión, por tratarse de una bomba vertical, o porque no haya puerto de medición disponible, se debe indicar en los formatos de registro de mediciones que no aplica la medición de succión. Sí es indispensable realizar la medición de la presión en la descarga.

Definición del nivel de referencia

Para el cálculo de la carga hidráulica total de bombeo, es conveniente definir un nivel de referencia, a partir del cual se medirán los otros niveles. Normalmente, el nivel de referencia se ubica sobre la placa base de montaje del motor, como se observa esquemáticamente en la Ilustración 1.19 y en la Ilustración 1.20.

En el caso de equipos de bombeo sumergibles, el nivel de referencia es normalmente el nivel de piso.

Medición del nivel dinámico de succión

El nivel de succión (ND_s) es la distancia vertical entre el nivel de referencia y el espejo de agua donde se está bombeando dicha agua en condiciones de operación normal y estable. La medición puede realizarse con una sonda de nivel o con un flexómetro, dependiendo de las condiciones del lugar. En el caso de un cárcamo de bombeo el nivel dinámico de succión será el nivel de la

Ilustración 1.19 Medición de niveles en caso de tener únicamente manómetro en la descarga de una bomba vertical

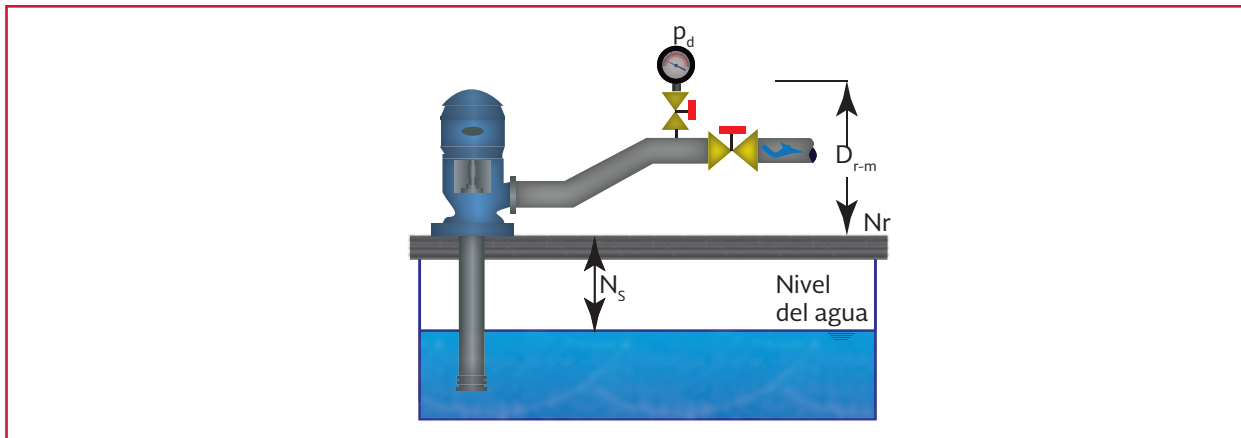


Ilustración 1.20 Medición de niveles en caso de tener manómetro en la succión y en la descarga

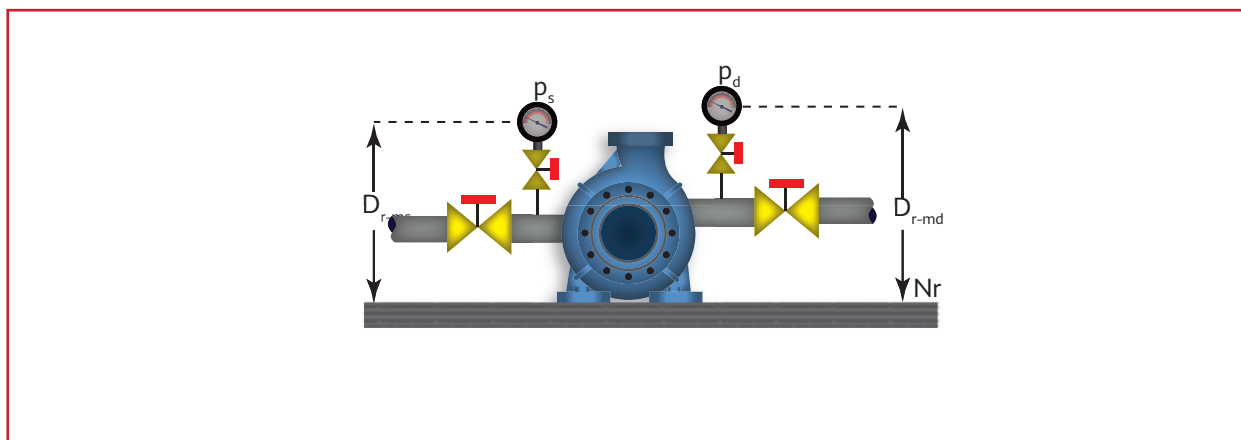


Ilustración 1.21 Medición del nivel dinámico de succión en cárcamos de bombeo



Ilustración 1.22 Medición del nivel dinámico de succión en cárcamos de bombeo



superficie libre del agua dentro del cárcamo, y en el caso de un pozo, el nivel de succión corresponde a su nivel dinámico en el acuífero. En las imágenes de la Ilustración 1.21 e Ilustración 1.22 se muestra la medición de nivel dinámico con una sonda eléctrica.

Si durante la medición en un cárcamo o tanque el nivel del agua cambia de posición significativamente, entonces la medición del nivel de succión debe hacerse de manera simultánea a las mediciones de caudal, presión y parámetros eléctricos. El valor podrá ser negativo o positivo, dependiendo de si el nivel se encuentra por debajo o por encima del nivel de referencia.

Medición de niveles a centros de manómetros

En la Ilustración 1.19 e Ilustración 1.20 se observa la manera de ubicar los niveles a centros de manómetros. Si solo se mide la carga de presión a la descarga, este nivel será designado como D_{r-m} .

En el caso que se midan las cargas de presión tanto a la succión como a la descarga, el nivel del manómetro de descarga será designado como

D_{r-md} y para el caso del manómetro de succión, como D_{r-ms} .

Determinación de la carga hidráulica de bombeo

Las mediciones de presión y niveles descritos en los incisos 1.2.1 a 1.2.5 se utilizan para calcular la carga hidráulica total de bombeo (H_b), la cual está constituida por la suma de varios valores medidos, que dependerán del tipo de bomba y el arreglo que se tenga.

En la Tabla 1.10 se describe el proceso de cálculo y los parámetros a considerar en la determinación de la carga hidráulica total de bombeo dependiendo del tipo de equipo y la aplicación.

1.2.11.3. Formatos de registro de datos en campo

Es importante el uso de formatos de campo organizados para registrar las características del sistema electromecánico de los equipos de bombeo, sus valores nominales y los datos obtenidos en las campañas de medición de los mismos.

En la Tabla 1.11 se muestra un ejemplo de formato para el registro de las características del sistema electromecánico y los datos nominales tanto de la bomba como del motor.

En la Tabla 1.12 se presenta un formato que puede utilizarse para anotar las mediciones de va-

riables hidráulicas y eléctricas de los equipos de bombeo y cálculos para determinar la eficiencia electromecánica que vienen enunciadas en la NOM-006-ENER-1995 Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. Límites y método de prueba.

Tabla 1.10 Proceso de cálculo para la carga hidráulica de bombeo (H_b) y parámetros a medir

Caso	Fórmula	Parámetros a medir o calcular
Cuando solo se mide la presión a la descarga	$H_b = P_d + ND_s + D_{r-m} + h_{fs} + H_v$	H_b = Carga total de bombeo (m)
		P_d = Carga de presión en la descarga (m)
		ND_s = Nivel dinámico de succión (m)
		D_{r-m} = Distancia del nivel de referencia a manómetro (m)
		h_{fs} = Pérdidas de carga hidráulica por efecto del cortante en la tubería de succión, más accesorios (m)
		H_v = Carga de velocidad (m)
Cuando se miden presión a la succión y descarga	$H_b = P_d - P_s + D_{r-ms} + D_{r-md}$	H_b = Carga total de bombeo (m)
		P_d = Carga de presión en la descarga (m)
		P_s = Carga de presión de succión (m)
		D_{r-ms} = Distancia del nivel de referencia al manómetro en la succión (m) y en la descarga (m)
		D_{r-md} = Distancia del nivel de referencia al manómetro en la succión (m) y en la descarga (m)

1.2.11.4. Elaboración de curvas de operación de equipos de bombeo

Las curvas de operación de los equipos de bombeo permiten contar con dos elementos claves en los análisis de eficiencia en sistemas de agua potable:

- Comparar la situación de operación actual con las condiciones originales de operación de los equipos de bombeo y valorar los niveles de capacidad de producción que ha perdido con el paso del tiempo, lo cual es un reflejo de la pérdida de rendimiento energético respecto a la original
- Contar con los datos necesarios para ali-

mentar de información al modelo de simulación hidráulica del sistema de agua potable, que es parte del proyecto de eficiencia hidráulica; viene explicado en la sección 3 del presente libro

Las curvas de operación de los equipos de bombeo, que se obtienen como producto de las mediciones eléctricas e hidráulicas, son principalmente dos:

- Curva de caudal (Q) vs carga de bombeo (H_b)
- Curva de caudal (Q) vs eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba (η_b)

Tabla 1.11 Formato para el registro de datos nominales y características del sistema electromecánico

Propietario:				
Domicilio:				
Localización del pozo:				
Parámetros garantizados de la bomba	Tipo: Vertical /sumergible	Marca:		
	No. Pasos:	Flujo (m ³ /s)		
	Carga total (m):	Eficiencia (%)		
Datos de la columna	Diámetro de succión (m):	Diámetro de la flecha (m):		
Datos de placa del motor	Marca:	Eficiencia (%)	Potencia (kW):	
	Tensión (V):	Corriente (A):	Frecuencia de rotación (RPM):	
Instrumentos de medición	Tipo	Certificado de calibración		
		Exactitud (%)	Expedido por	Fecha de vencimiento
Carga de presión en la descarga				
Nivel dinámico	Sonda eléctrica:			
	Sonda neumática:			
Potencia eléctrica (medición directa)				
Potencia eléctrica medición indirecta	Voltímetro			
	Amperímetro			
	Factorímetro			
Duración de la prueba	Fecha:	Responsable		
	Hora de inicio:	Hora de finalización		

Para construir las curvas $Q-H_b-\eta_b$ es necesario realizar la medición de parámetros hidráulicos y eléctricos al menos en tres a cuatro situaciones de operación de los equipos de bombeo. Para ello, se realiza la modificación de presión de la descarga, estrangulando en un determinado porcentaje la válvula situada aguas abajo de la bomba de manera gradual hasta que se establezca la nueva condición

simulada de operación. De esa manera se obtienen valores para varias condiciones de funcionamiento, donde se registran todas las variables eléctricas e hidráulicas que serán procesadas para construir las curvas respectivas. En la Tabla 1.13 se muestra un ejemplo del consolidado de mediciones para este fin y el resultado en equipos y la Ilustración 1.23 las curvas características $H-Q$.

Tabla 1.12 Reporte de pruebas de campo de acuerdo con la NOM 006 ENER 1995

#	Símbolo	Descripción	1	2	3	4
1	D_i	Diámetro interno de la tubería (m)				
2	n	Frecuencia de rotación (r/min)				
3	ND	Nivel dinámico (m)				
4	X	Distancia desde el nivel de referencia a la línea de centros del manómetro (m)				
5	P_l	Lectura del manómetro a la descarga (m)				
6	P_m	Presión a la descarga = [(4) + (5)] (m)				
7	A	Área del tubo a la descarga = [3 141 592 (1) ² /4] (m ²)				
8	q_v	Flujo (m ³ /s)				
9	h_v	Carga de velocidad = [(8)/(7)] ² /19 613] (m)				
10	h_{fc}	Pérdidas de fricción en la columna (m)				
11	h_d	Carga a la descarga [(6) + (9) + (10)] (m)				
12	H	Carga total [(3) + (11)] (m)				
13	I_A I_B I_C \bar{I}	Corriente línea A Corriente línea B Corriente línea C Promedio = [(I_A + I_B + I_C)/3] (a)				
14	V_{AB} V_{AC} V_{CB} \bar{V}	Tensión fase AB Tensión fase AC Tensión fase BC Promedio = [(V_{AB} + V_{AC} + V_{BC})/3] (V)				
15	FP_S FP_B FP_C F_p	Factor de potencia línea A Factor de potencia línea B Factor de potencia línea C Promedio = [(FP_A + FP_B + FP_C)/3] (%)				
16	P_e	Potencia de entrada al motor = 1 732(13)(14)(15) x 10 ⁻⁵ (kW)				
17	P_s	Potencia de salida de la bomba = [9 806 (8)(12)] (kW)				
18	h	Eficiencia electromecánica = [(17)/(16)]x100 (%)				

Tabla 1.13 Consolidado de mediciones para curvas $Q-H_b-\eta_b$ en un organismo operador

Equipo	Mediciones				Cálculos	
	Gasto (L/s)	Presión (kg/cm ²)	Nivel dinámico (m)	Potencia eléctrica (kW)	Carga (m)	Eficiencia (%)
Pozo 5 Ferrería	38.00	4.20	75.00	83.00	117.00	52.50
	31.00	6.20	74.00	75.00	136.00	55.10
	21.00	7.00	73.50	71.00	143.50	41.60
Pozo 9 Huizache 1	36.50	0.70	42.00	46.00	49.00	38.10
	21.80	3.20	42.00	41.00	74.00	38.60
	19.50	3.40	42.00	40.00	76.00	36.30
Pozo 24 López Portillo	47.00	2.60	70.00	94.00	96.00	47.10
	30.00	7.80	58.00	63.00	136.00	63.50
	24.00	9.00	50.00	57.00	140.00	57.80
Pozo 46 Secundaria Benito Juárez	56.00	3.70	47.00	83.00	84.00	55.60
	34.00	9.00	44.00	89.00	134.00	50.20
	18.00	11.80	42.00	81.00	160.00	34.90
Pozo 59 Azcapotzalco	35.00	0.80	92.00	82.00	100.00	41.90
	23.00	3.70	90.00	82.00	127.00	34.90
	10.00	6.20	89.00	80.00	151.00	18.50
Pozo 2 Gabino Santillán	36.50	0.00	59.00	62.00	59.00	34.10
	27.50	4.30	59.00	69.00	102.00	39.90
	12.50	7.80	50.00	69.00	128.00	22.70
	5.50	9.00	50.00	71.00	140.00	10.60
Pozo 31 Joyas del Valle	19.00	0.50	37.00	30.00	42.00	26.10
	13.00	0.90	35.50	30.00	44.50	18.90
	2.40	2.20	31.50	32.00	53.50	3.90
Pozo 78 San Luis	46.50	1.80	54.00	74.00	71.50	44.10
	31.00	4.00	50.80	71.00	90.80	38.90
	12.00	7.00	42.00	59.00	112.00	22.30

Ilustración 1.23 Curvas características reales $H-Q$ en pozos de un organismo operador

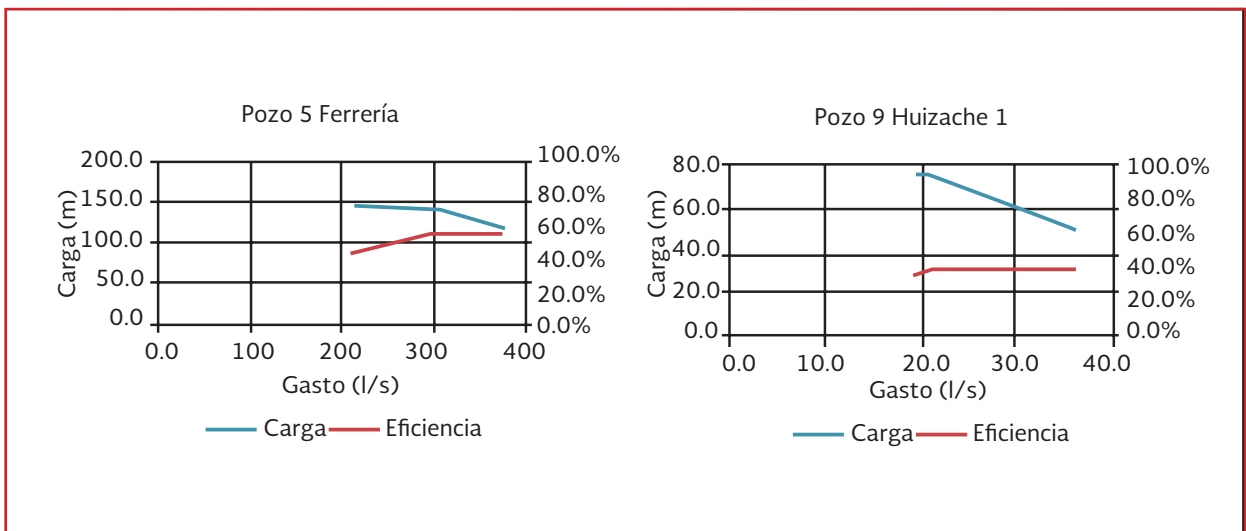


Ilustración 1.23 Curvas características reales H-Q en pozos de un organismo operador (continuación)



2

EFICIENCIA FÍSICA

2.1. DIAGNÓSTICO DE EFICIENCIA FÍSICA

La eficiencia física ($\eta_{física}$) se refiere a la conservación del agua en el sistema de abastecimiento y se calcula en porcentaje (CONAGUA, 2005) como:

$$\eta_{física} = \frac{Vol_{consumido}}{Vol_{suministro}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde:

$\eta_{física}$	=	eficiencia física
$Vol_{consumido}$	=	cantidad de agua, medida o no (cuota fija), que reciben los usuarios en sus tomas, estén o no registradas por el organismo operador
$Vol_{suministrado}$	=	cantidad de agua producida o extraída de las fuentes de abastecimiento

La eficiencia física determinada con la Ecuación 2.1 refleja, en buena medida, la capacidad que tiene un sistema de abastecimiento para entre-

gar el agua inyectada de la red hasta los usuarios y la magnitud del volumen de las fugas existentes. Sin embargo, el valor de la eficiencia física no manifiesta de manera exacta el nivel de deterioro de la tubería, tomas domiciliarias y otros elementos del sistema.

Por esta razón, recientemente se promueve la aplicación de indicadores relativos que dependen de la longitud, la presión media, el tiempo de servicio y el número de tomas domiciliarias que tiene la red de distribución.

La *International Water Association* (IWA) recomienda la utilización del Indicador de Fugas Estructural (IFE) que se calcula mediante la Ecuación 2.2.

$$IFE = \frac{VIF}{UMF} = \frac{nt \frac{Vol_{if}}{tn_t}}{(ALong_r + Bn_t + CLong_t) P_{med}} \\ = \frac{Vol_{if}}{d(ALong_r + Bn_t + CLong_t) P_{med}}$$

Ecuación 2.2

donde:

VIF	=	indicador del volumen de fugas, $m^3/(toma\ d)$
UMF	=	umbral mínimo de fugas (referencia óptima), $m^3/(toma\ d)$
Vol_{if}	=	volumen de fugas en el sistema (m^3)
t	=	tiempo de operación del sistema (días)
n_t	=	número total de tomas domiciliarias registradas
$A, B\ y\ C$	=	constantes que ponderan la variable que acompañan y que han sido determinadas con un análisis estadístico de 20 países; $A=18, B=0.8, C=25$
$Long_r$	=	longitud total de la tubería de la red de distribución (km)
$Long_t$	=	suma de las longitudes de todas las tomas domiciliarias (km)
P_{med}	=	carga de presión media en la red de distribución (m)

Un valor del IFE igual a uno deberá ser interpretado como el estado físico óptimo deseable en una red de abastecimiento. En la medida en que este valor se incremente, se interpretará como que la red se encuentra más deteriorada.

El objetivo del diagnóstico de eficiencia física es precisamente determinar los valores del indicador de eficiencia de la Ecuación 2.1 y del Indicador de Fugas Estructural (IFE) de la Ecuación 2.2 e identificar y cuantificar las pérdidas reales o fugas, así como proporcionar las bases para la elaboración de un proyecto de incremento de la eficiencia física del sistema, cuyo desarrollo se presenta en la sección 2.2 de este libro.

El diagnóstico de la eficiencia física de un sistema de agua potable se elabora con base en el balance de agua, que es una técnica para auditar detalladamente la forma de administrar el suministro y el consumo de agua de un sistema de agua potable y discriminar las pérdidas reales de las aparentes. En la Ilustración 2.1 se presenta la estructura del balance de agua, que es una herramienta útil de "buenas prácticas" que permite identificar como se distribuye el volumen en el sistema (IWA, 1999).

Para efectos de aplicación, el balance de agua está dividido en tres fases que contienen varias tareas, actividades de análisis y cálculos, los cuales se esquematizan de la siguiente manera:

Fase I:

- a. Establecer hoja de cálculo
- b. Definir periodo de análisis
- c. Elegir unidad de medida

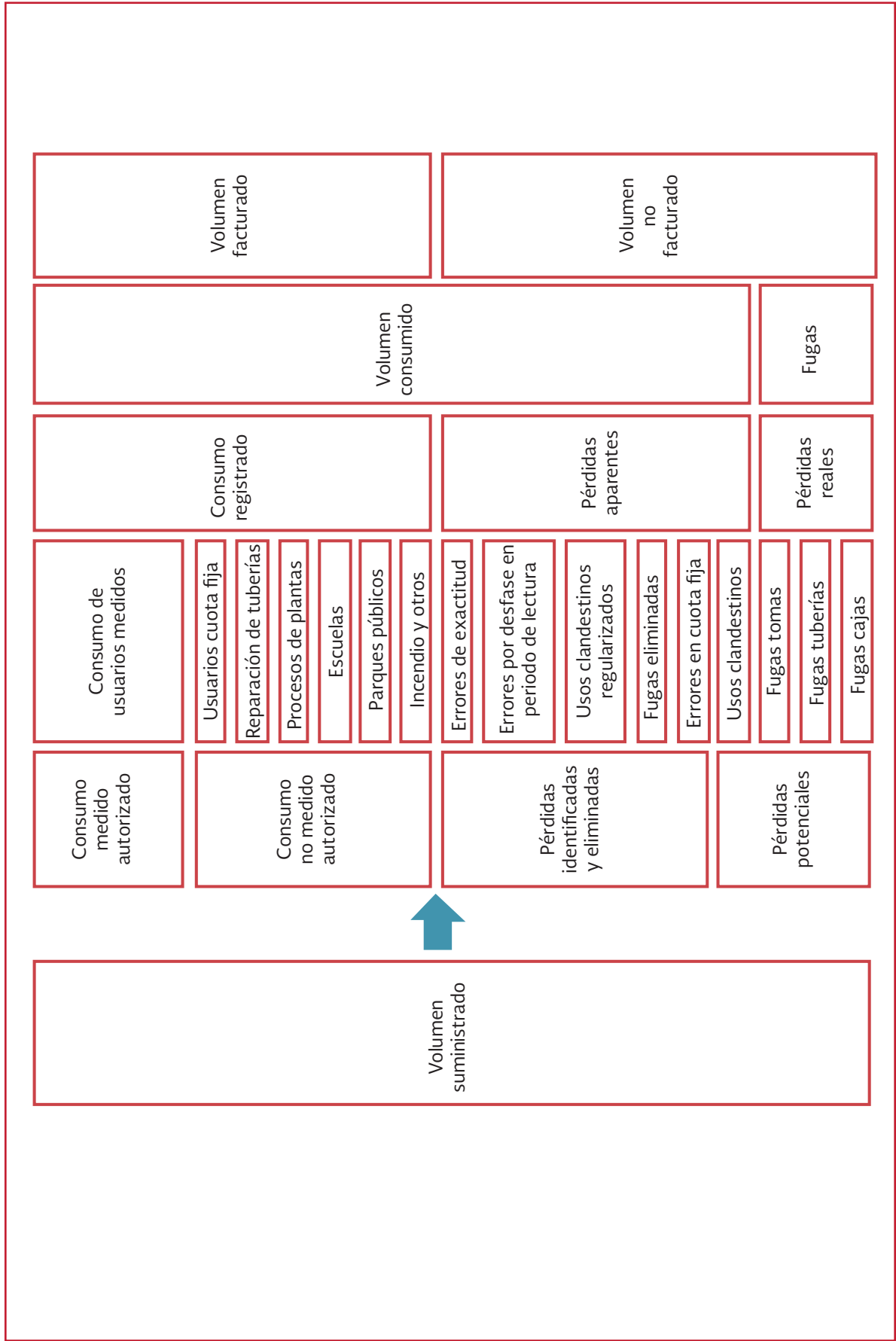
Fase II:

- a. Cuantificar el suministro de agua
- b. Estimar consumos medidos autorizados
- c. Estimar consumos no medidos autorizados
- d. Calcular pérdidas identificadas y eliminadas
- e. Estimar pérdidas potenciales totales

Fase III:

- a. Identificar pérdidas reducibles y acciones
- b. Determinar los beneficios de la reducción de pérdidas
- c. Calcular costos y tiempo de reducción de pérdidas

Ilustración 2.1 Estructura estándar del balance de agua Ochoa y Reyes (2008)



A continuación, se presenta una descripción de los procedimientos que deben seguirse para elaborar un balance de agua potable, según las fases I y II y las tareas correspondientes a cada una; la Fase III son las oportunidades de mejora del sistema.

2.1.1. HOJA DE CÁLCULO, PERIODO DE ANÁLISIS Y UNIDAD DE MEDIDA

En el anexo A.3 de este libro se muestra un formato de cálculo que puede utilizarse para facilitar la aplicación del balance de agua. Este balance de agua se aplica en un periodo específico, de acuerdo con la disponibilidad de estadísticas históricas del organismo operador. Lo común y más confiable es realizar el balance de agua con los datos del último año de registro, sin embargo, en ocasiones no hay suficiente información, por lo que puede realizarse en periodos menores, hasta de un mes; en este caso, los resultados serán menos exactos.

Se recomienda utilizar y convertir todos los datos para el cálculo en metros cúbicos (m^3).

2.1.2. CUANTIFICACIÓN DEL SUMINISTRO DE AGUA

Primero se identifican las fuentes de agua y obras de captación del sistema de abastecimiento, pozos, galerías, manantiales, estaciones de bombeo, tanques de regulación y almacenamiento, etc. El análisis de esta información se facilita si se construye un croquis de localización sobre el plano de la ciudad.

Después se colectan, revisan y ordenan los registros históricos de volúmenes de agua produ-

cida por mes y por cada una de las captaciones; utilizando un cuadro similar al presentado en la Tabla 2.1.

Estas cantidades se consideran volúmenes no corregidos de agua suministrada en el periodo, puesto que existen factores que ocasionan errores en los registros, por ejemplo:

- Macromedidores inexactos
- Cambios en el volumen de almacenamiento en los tanques de regulación
- Captaciones sin medidor
- Fugas antes del punto de entrega a la red de distribución
- Entregas en ruta a usuarios no registrados, como ejidos, etc.

El volumen total corregido de agua suministrada es igual a la suma de ajustes parciales por error de macromedición, almacenamiento en tanques, fugas, captaciones sin medidor o sin registros, etcétera.

2.1.2.1. Volúmenes de producción no registrados

En fuentes que no cuenten con equipo de medición o sin registros históricos, se deben realizar mediciones puntuales y estimar los volúmenes producidos en el periodo del balance. La medición se realizara según las especificaciones y recomendaciones señaladas en las secciones 1.2.2 y 1.2.3 de este libro.

La ecuación para calcular la estimación del volumen producido (en m^3) en cada captación es la siguiente:

$$Vol_{estap} = \sum_{i=1}^m 86.4 Q_{mi} \left(\frac{t_{0Ai}}{24} \right) Per_{bal} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

donde:

- Vol_{estap} = volumen estimado total de agua producida (m³/año)
- Q_m = caudal medio registrado en el equipo portátil (L/s)
- t_{0Ai} = tiempo de operación anual de la captación (h/año)
- Per_{bal} = periodo de análisis del balance (d)
- i = captación en turno
- m = número total de captaciones en el sistema de agua potable
- 86.4 = Coeficiente de conversión

2.1.2.2. Corrección de volúmenes de producción por inexactitud de macromedidores instalados

Para ajustar el volumen de producción por error de macromedición se debe determinar el error

de los equipos de medición instalados y con registros históricos siguiendo el procedimiento de la sección 1.2.4 del libro.

2.1.2.3. Corrección de volúmenes de producción por cambio en los volúmenes de almacenamiento en tanques

Se deben detectar cambios en los volúmenes de almacenamiento de los tanques de regulación, los cuales se calculan con la Ecuación 2.4.

$$Vol_A = \sum_{i=1}^{mt} Vol_{it} (Vol_{ft}) \quad \text{Ecuación 2.4}$$

donde:

- Vol_A = volumen de ajuste por almacenamiento (m³)
- Vol_{it} = volumen inicial en el tanque j (m³)
- Vol_{ft} = volumen final en el tanque j (m³)
- mt = número total de tanques en el sistema de agua potable

Tabla 2.1 Ejemplo de volúmenes de agua producida en un sistema de abastecimiento urbano

Captación con macromedidor funcionando						
Mes	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	...	Pozo n	Total
Enero	327 734	629 262	646 117			1 603 113
Febrero	299 335	516 608	637 338			1 453 281
Marzo	333 249	603 436	777 520			1 714 205
Abril	311 892	609 729	672 399			1 594 020
Mayo	315 896	565 540	783 896			1 665 332
Junio	297 541	532 259	715 818			1 545 618
Julio	303 185	479 046	762 757			1 544 988
Agosto	297 757	540 910	760 955			1 599 622
Septiembre	296 541	551 421	677 010			1 524 972
Octubre	288 283	597 929	602 986			1 489 198
Noviembre	293 294	445 265	688 173			1 426 732
Diciembre	302 902	488 629	723 927			1 515 458
Total	3 667 609	6 560 034	8 448 896	0	0	18 676 539

Tabla 2.2 Ejemplos de consumos medidos autorizados sin corregir (m³)

Mes	Tipo de uso					Total
	Doméstico	Comercial	Servicios públicos	Industrial	Hotelero	
Enero	402 045	23 952	31 512	0	9 225	466 734
Febrero	406 576	23 736	31 578	0	9 082	470 972
Marzo	413 682	22 877	30 463	0	6 659	473 681
Abril	449 150	25 588	33 973	0	7 083	515 794
Mayo	418 240	22 116	27 923	0	6 777	475 056
Junio	433 748	22 143	30 390	0	6 570	492 851
Julio	420 535	22 208	32 434	0	6 942	482 119
Agosto	412 723	21 218	29 885	0	6 662	470 488
Septiembre	435 732	22 327	33 964	0	7 032	499 055
Octubre	410 500	20 469	34 814	0	6 245	472 028
Noviembre	426 235	22 337	30 957	0	6 628	486 157
Diciembre	387 148	19 518	31 728	0	5 751	444 145
Total	5 016 314	268 489	379 621	0	84 856	5 749 080

2.1.3. ESTIMACIÓN DE CONSUMOS MEDIDOS AUTORIZADOS

Esta actividad consiste en determinar cuánta agua consumieron los usuarios (a los que se les hace lectura con una frecuencia determinada y están registrados en el padrón de usuarios con sus estadísticas de volumen consumido) que cuentan con medidor domiciliario, sean domésticos, comerciales, industriales y especiales.

El volumen mensual medido y autorizado total por tipo de uso se registra en una tabla como la Tabla 2.2.

Estos valores de consumos medidos autorizados pueden tener errores de lectura o exactitud de los micromedidores durante el proceso de registro, por lo que deben ser considerados como consumos medidos autorizados sin corregir.

2.1.4. ESTIMACIÓN DE CONSUMOS NO MEDIDOS AUTORIZADOS

Debido a que es muy común encontrar tomas domiciliarias autorizadas por el organismo operador que no cuentan con micromedidor, es necesario estimar el volumen de agua consumido por estos usuarios para considerarlo en el balance de agua del sistema.

A estas tomas domiciliarias sin micromedidor normalmente se les aplica un volumen fijo de consumo mensual, que es determinado por el propio organismo con base en sus estadísticas, experiencias o pruebas de campo.

Para el análisis del balance de agua, estos consumos asignados a los usuarios con cuota fija se cuantifican y se registran por mes y tipo de usuario como se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Ejemplo de estadísticas de consumos de usuarios con cuota fija

Mes	Tipo de uso						Total
	Doméstico	Comercial	Servicios públicos	Industrial	Hotelero	Otros	
Enero	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Febrero	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Marzo	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Abril	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Mayo	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Junio	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Julio	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Agosto	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Septiembre	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Octubre	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Noviembre	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Diciembre	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Total	1 504 800	87 600	122 400	0	35 088	0	1 749 888

Hay que tener en cuenta que estos valores de consumo de cuota fija pueden perder exactitud si no han sido actualizados por el organismo operador; deberá calcularse este error como se describe en la sección 1.2.5 de este libro.

Además de los volúmenes de usuarios con cuota fija, existen otros consumos de agua sin medición que están autorizados por el organismo operador, como:

- Vaciados en las reparaciones de tubería
- Agua utilizada en los procesos de potabilización y tratamiento
- Riego de áreas verdes públicas
- Agua para combatir incendios

Estos volúmenes de consumo de agua no medidos y autorizados deberán ser, en la medida de lo posible, cuantificados en el mismo periodo de análisis del balance de agua con el fin de afinar los resultados de las potenciales pérdidas de agua en el sistema. El procedimiento de cálculo se puede consultar en el libro *Reducción integral de pérdidas de agua potable* (Ochoa y Bourguett,

1998). De cualquier manera, en el formato del balance de agua incluido en el anexo A.3 de este libro, se incluyen los cuadros de cálculo correspondientes.

2.1.5. CÁLCULO DE PÉRDIDAS IDENTIFICADAS Y ELIMINADAS

Antes de determinar el valor de las pérdidas potenciales del sistema de agua potable, es decir, los volúmenes de fugas y usos clandestinos que permanecen latentes en la red de distribución de agua, es necesario estimar algunas pérdidas de agua que son fácilmente identificables en el periodo de análisis del balance de agua. Estas pérdidas de agua identificables son:

- Consumo de agua por errores de exactitud en los micromedidores
- Consumo de agua por desfase en periodos de lectura de medidores
- Consumo de agua de usuarios fraudulentos y clandestinos regularizados
- Volumen de fugas reparadas

- Consumo de agua por errores en asignación de cuotas fijas

Si existen datos estadísticos en el organismo operador, pueden estimarse para tener mayor precisión en el balance de agua las otras pérdidas identificables, tales como derrames en tanques y cárcamos de bombeo, evaporación en depósitos abiertos y consumo de agua por errores en el proceso contable.

Los valores de estas pérdidas de agua potable deben sumarse o restarse, según sea el caso, al volumen de agua suministrada al sistema de distribución, a continuación se describen los procedimientos para estimarlos.

2.1.5.1. Consumo de agua por errores de exactitud en los micromedidores

El error de exactitud de micromedidores se determina mediante un muestreo de campo con el procedimiento indicado en la sección 1.2.6 de este libro. Es recomendable determinar el error por modelo o marca del micromedidor, siempre y cuando se disponga de estadísticas o se puedan calcular los consumos mensuales asociados a estas marcas o modelos. En la práctica, para la realización del balance de agua basta con realizar un muestreo de usuarios domésticos y otro de grandes usuarios (comerciales, industriales, mixtos y especiales).

El consumo de agua por errores de exactitud en micromedidores (volumen de ajuste) se estima entonces con la Ecuación 2.5.

$$\begin{aligned} \text{Volumen de ajuste} = & \\ & \frac{\text{volumen de consumo medio sin corregir}}{\left(1 + \frac{\text{Error de exactitud del micromedidor}(\%)}{100}\right)} \\ & - \text{volumen de consumo medio sin corregir} \end{aligned}$$

Ecuación 2.5

2.1.5.2. Consumo de agua por desfase en periodos de lectura de medidores

Es común que el periodo utilizado en el balance de agua no coincida exactamente con las fechas de toma de lecturas de micromedidores y/o macromedidores. El ajuste de consumo de agua por este desfase se realiza desde la Ecuación 2.6 a la Ecuación 2.8.

$$Vol_{ip} = Vol_{map} \frac{D_{il}}{nD_{map}} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

donde:

Vol_{ip}	=	volumen de consumo de agua ajustado para el inicio del periodo (m ³)
Vol_{map}	=	volumen de consumo de agua contabilizado en el mes anterior al periodo (m ³)
D_{il}	=	día del mes de la toma de lecturas (d)
nD_{map}	=	número de días del mes anterior al periodo (días)

$$Vol_{fp} = Vol_{ump} \frac{nD_{ump} - D_l}{nD_{map}} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

donde:

Vol_{fp} = volumen de consumo de agua ajustado para el final del periodo (m^3)

Vol_{ump} = volumen de consumo de agua contabilizado en el último mes del periodo (m^3)

nD_{ump} = número de días del último mes del periodo (días)

$$Vol_t = Vol_{ip} + Vol_{fp} - Vol_{ump} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

donde:

Vol_t = volumen de consumo de agua ajustado total (m^3)

2.1.5.3. Consumo de agua de usuarios fraudulentos y clandestinos regularizados

En la categoría de usuarios fraudulentos y clandestinos se encuentran las tomas domiciliarias detectadas con las siguientes características:

- Arreglos o conexiones autorizadas que evitan la medición y registro real del volumen de agua consumido
- Conexiones hechas directamente por los usuarios sin autorización ni registro por parte del organismo operador
- Conexiones registradas en el padrón de usuarios con usos distintos al uso real

El volumen de agua consumida por estos usuarios, antes de ser detectado y regularizado, representa una pérdida identificada y eliminada cuyo volumen debe estimarse de la siguiente manera:

1. Restar primero al consumo promedio estimado en la zona socioeconómica donde se detectó el fraude, el consumo promedio en la toma fraudulenta antes de su detección, muchas veces es igual a cero, toma no registrada o clandestina
2. El resultado de la resta se multiplica por el número de meses que estuvo funcionando en estado fraudulento
3. El resultado se multiplica por el número de tomas del mismo tipo de uso, localizado y regularizado
4. Esta estimación se realiza por separado para todos los usos y zonas socioeconómicas

En la Tabla 2.4 se muestra un ejemplo de la forma de registrar estos volúmenes de pérdidas identificadas por usos fraudulentos y clandestinos regularizados.

2.1.5.4. Volumen de fugas reparadas

Durante el periodo de análisis del balance de agua seguramente se repararon fugas, cuyo volumen debe ser estimado para descontarlo del volumen suministrado a la red de distribución. El volumen de fugas reparadas se calcula multiplicando su caudal unitario promedio por el número de fugas reparadas y por el tiempo que permanecieron sin repararse. En el caso de que los reportes de las fugas reparadas en el periodo no cuenten con registros de aforos, el caudal unitario promedio de fugas se puede obtener en forma aproximada aforando todas las fugas reparadas por el organismo operador en un lapso de tres a cuatro semanas.

Para facilitar la cuantificación del volumen de agua de las fugas ocurridas en el periodo del ba-

Tabla 2.4 Ejemplo de de registro de pérdidas por usos, fraudulentos y clandestinos regularizados

Zona socioeconómica	Num. de conexiones descubiertas	Consumo promedio antes de su detección	Consumo promedio de la zona	Num. de meses que estuvieron ocultas	Volumen de agua por usos clandestinos regularizados
		m³/mes	m³/mes		m³
Popular	27	6	19	6	2 106
Media	34	7	30	6	4 692
Residencial	12	0	45	6	3 240
Comercial	5	9	70	6	1 830
Industrial	1	0	920	2	1 840
Otros servicios	0				0
				Total	13 708

lance, la clasificación debe ser: en fugas ocurridas en tomas domiciliarias, en tubería de conducción y distribución y en cajas de válvulas.

Adicionalmente y para realizar una mejor estimación de volúmenes de fugas reparadas en el periodo del balance de agua, los tipos de fugas arriba mencionados se subdividen de acuerdo con los puntos y zonas de ocurrencia.

Por ejemplo, las fugas en tomas domiciliarias se subdividen por zonas de presión, considerando la presión media de operación (en kg/cm²); las fugas en la red se subdividen de acuerdo con los diámetros de la tubería donde ocurren, y las fugas en cajas de válvulas se subdividen en la pieza de ocurrencia, estopero, junta, otros.

Para cada una de estas subdivisiones se estima el volumen de agua perdida con la Ecuación 2.9. El registro de estas estimaciones se puede concentrar como se muestra en la Tabla 2.5.

$$Vol_{fp} = 0.0864n_f Q_f t_f \quad \text{Ecuación 2.9}$$

donde:

- Vol_{fr} = volumen de fugas reparadas (m³)
- n_f = número de fugas reparadas
- Q_f = caudal promedio de fugas (L/s)
- t_f = tiempo promedio de permanencia de las fugas, desde el inicio del periodo del balance de agua hasta ser reparada (d)
- 0.0864 = coeficiente de conversión de mL/s a m³

2.1.5.5. Consumo de agua por errores en asignación de cuotas fijas

Estas pérdidas se detectan comparando las cuotas fijas asignadas (consumos unitarios asignados) para cada tipo de usuario, con los consumos unitarios reales; valorados de acuerdo a los procedimientos señalados en la sección 1.2.5 de este libro.

El padrón de usuarios con cuota fija debe subclasificarse por tipos de usuario: doméstico, co-

Tabla 2.5 Ejemplo de concentrado de fugas identificadas y eliminadas

Fugas identificadas y reparadas					
Fugas en tomas domiciliarias					
Zona de presión de la ciudad		Nº. Fugas reparadas	Gasto promedio de fuga	Tiempo que existió la fuga	Volumen de agua perdida
kg/cm ²			mL/s	días	m ³
0-1		440	35	7	9 314
1.1-2		532	60	3	8 274
2.1-3		0			0
3.1-4		0			0
más de 4		0			0
				Total	17 588
Fugas en tubería de la red principal y secundaria					
Diámetro del tubo		Nº. Fugas reparadas	Gasto promedio de fuga	Tiempo que existió la fuga	Volumen de agua perdida
pulgadas	m		mL/s	días	m ³
3, 4 y 6	0.0762, 0.1016 y 0.1524	46	255	5	5 067
8 y 10	0.2032 y 0.254	24	312	3	1 941
12 a 20	0.3048 a 0.508	15	714	2	1 851
más de 20	Más de 0.508	8	1 250	2	1 728
				Total	10 587
Fugas en cajas de válvulas					
Tipo de fuga	Num. de fugas reparadas	Gasto promedio de fuga	Tiempo que existió la fuga	Volumen de agua perdida	
		mL/s	días	m ³	
Estopero	0			0	
Junta	0			0	
Otro	0			0	
				Total	0

mercial, industrial, mixto, servicios públicos y otros y para cada uno se comparan los consumos unitarios asignados y valorados.

El consumo de agua por errores en asignación de cuotas fijas se determina con la Ecuación 2.10 y con la Ecuación 2.11.

$$Err_{cucf} = \frac{Cu_A - Cu_v}{Cu_v} \times 100 \quad \text{Ecuación 2.10}$$

donde:

- Err_{cucf} = error de consumo unitario en cuota fija (\pm %)
- Cu_A = consumo unitario de cuota fija asignado (m³/mes)
- Cu_v = consumo unitario de cuota fija valorado (m³/mes)

$$C_{ECF} = \frac{Vol_{ucf}}{1 + \frac{\%Err_{cucf}}{100}} - Vol_{ucf} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

donde:

C_{ECF} = consumo de agua por error de cuota fija en el periodo del balance de agua ($\pm m^3$)

Vol_{ucf} = volumen de consumo de agua de usuarios con cuota fija en el periodo del balance de agua sin corregir (m^3)

Err_{cucf} = error de consumo unitario en cuota fija ($\pm \%$)

2.1.6. ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS POTENCIALES TOTALES

El volumen de pérdidas potenciales totales es el agua que ha sido suministrada a la red de distribución y que, por un lado, se desperdicia en fugas permanentes que no han sido detectadas y, por otro, en agua que es consumida por los usuarios pero que el organismo operador no tiene control de ella.

Este volumen de pérdidas potenciales totales en el periodo de análisis del balance de agua se obtiene con la Ecuación 2.12.

$$Vol_{epp} = Vol_{sumacorr} - Vol_{masc} - Vol_{nma} - Vol_{peridel} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

donde:

Vol_{epp} = volumen estimado de pérdidas potenciales totales (m^3)

$Vol_{sumacorr}$ = volumen de suministro total de agua corregido (m^3)

Vol_{masc} = volumen consumido medido total autorizado sin corregir (m^3)

Vol_{nma} = volumen consumido total no medido autorizado (m^3)

$Vol_{peridel}$ = volumen de pérdidas totales identificadas y eliminadas (m^3)

Como puede observarse, las pérdidas potenciales totales representan el volumen de agua que ingresa al sistema de distribución, pero cuyo destino y uso final se desconoce.

Para efectos de estimación de pérdidas totales en el sistema de abastecimiento basta con este cálculo; sin embargo, si se desea discriminar cuánto volumen de esta agua corresponde a fugas (pérdidas reales) y cuánta a usos no controlados (pérdidas aparentes), es necesario utilizar los procedimientos indicados en la sección 1.2.7. De igual manera, con los resultados de la vinculación de tomas domiciliarias, señalado en la sección 1.2.10 del libro, se puede estimar el potencial de pérdidas aparentes en el sistema.

El resto del volumen de agua corresponderá a las fugas en tubería de la red principal y secundaria. Con todos estos resultados se calcula el indicador de eficiencia física del sistema de abastecimiento de agua potable, utilizando la Ecuación 2.1, que con las variables estimadas con el balance de agua, queda como se muestra en la Ecuación 2.13.

$$\eta_{física} = 1 - \frac{Vol_{epp}}{Vol_{sumacorr}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2.13}$$

donde:

- $\eta_{física}$ = eficiencia física del sistema de abastecimiento de agua potable (%)
- Vol_{eprp} = volumen estimado de pérdidas reales potenciales (fugas) (m³)
- $Vol_{sumacorr}$ = volumen de suministro total de agua corregido (m³)

Es importante conocer este indicador para definir las acciones de reducción y control de fugas. Con valores cercanos al 15 por ciento se reflejan sistemas de agua potable sin problemas de fugas significantes, solo se deberán mejorar sus acciones de control. En cambio, si el indicador rebasa el 20 por ciento es necesario realizar acciones de eliminación y control de fugas de manera inmediata.

2.1.7. PÉRDIDAS REDUCIBLES Y ACCIONES

No todas las pérdidas reales potenciales se pueden detectar y reducir, pues siempre existirá un grupo de fugas (llamadas fugas latentes), imperceptibles a los aparatos de detección y cuya localización no es rentable.

En el mundo, el porcentaje límite de este tipo de fugas es 15 por ciento del volumen de agua total suministrado corregido; no obstante, si nos basamos en las condiciones actuales de los sistemas de agua potable y en la experiencia de organismos operadores de México, que han realizado acciones de reducción de fugas, lo adecuado y viable es lograr un porcentaje de 20 por ciento. Sin embargo, siempre será mejor realizar un análisis para llegar a un equilibrio económico de la reducción de pérdidas.

En el caso de las pérdidas aparentes, su regularización puede alcanzar el 100 por ciento a partir de un programa adecuado de trabajo sobre la actualización del padrón de usuarios y con un sistema de facturación efectivo. Los ahorros de agua y energía simultáneos se obtienen al reducir los volúmenes de fugas. El agua de fugas reparadas se deja de bombear y al eliminar fugas se tiene menor carga dinámica de bombeo. En cambio, las pérdidas aparentes por uso clandestino y fraudes representan un problema de tipo administrativo y legal para el organismo operador del sistema de agua, pero estos usuarios irregulares no dejarán de consumir agua después de ser identificados e incorporados a la facturación.

Por lo tanto, de aquí en adelante serán consideradas únicamente las acciones de reducción de fugas en la evaluación de costos y beneficios.

El volumen total de fugas reducible se calcula con la Ecuación 2.14.

$$Vol_{fr20\%} = Vol_{fat} - Vol_{fpl} = Vol_{fat} - 0.2Vol_{sumacorr}$$

Ecuación 2.14

donde:

- $Vol_{fr20\%}$ = volumen de fugas reducibles al 20% (m³)
- Vol_{fat} = volumen actual de fugas potencial total (m³)
- Vol_{fpl} = volumen de fugas que permanecerán latentes (m³)
- $Vol_{sumacorr}$ = volumen del suministro total de agua corregido (m³)

En la Tabla 2.6 se presenta un cuadro resumen de pérdidas reducibles clasificadas en fugas de tubería, tomas domiciliarias y cajas de válvulas. Una vez definido el volumen de fugas, se pro-

Tabla 2.6 Ejemplo de cálculo de volúmenes de fugas reducibles

Volumen de fugas reducible para no rebasar 20% del volumen de suministro				
Porcentaje límite a reducir (%)				20.00
Suministro de agua corregido (m ³)				18 449.483
Volumen de fugas reales potenciales totales	Porcentaje de volumen de fugas respecto del suministro de agua	Volumen de fugas por reducir para no rebasar 20% del volumen suministrado*	Volumen de fugas latentes	Porcentaje de volumen de fugas latentes respecto al suministro
m ³	%	m ³	m ³	%
7 243.733	39.26	4 401.816	2 841.816	15.40
2 161.407	11.72	1 313.427	847.980	4.60
0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
9 405.140	50.98	5 715.243	3 689.897	20.00

(*) Nota: el volumen de fugas por reducir en cada tipo de fuga se obtuvo en forma proporcional al total

graman las acciones de eliminación y control de fugas, de acuerdo con los criterios establecidos en el proyecto de eficiencia física descrito en la sección 2 del libro.

2.1.8. BENEFICIOS DE LA REDUCCIÓN DE FUGAS

El mayor beneficio directo en costos de producción y distribución de agua, al reducir las fugas, es principalmente el ahorro de energía eléctrica y potabilización. Los beneficios indirectos al reducir fugas se vinculan al ahorro en costos por:

- Desfase en construcción de nueva infraestructura de agua y energía eléctrica
- Disminución del deterioro de infraestructura existente
- Reducción del mantenimiento excesivo

Existen otros beneficios que impactan en la eficiencia del servicio de agua, como la conservación de fuentes de abastecimiento lo-

cales, menores emisiones de CO₂, mejor imagen institucional, incremento en la continuidad y cobertura del servicio, aumento en la calidad del agua entregada a usuarios, y mayor disponibilidad en cantidad y presión.

2.1.8.1. Beneficios por ahorro de energía eléctrica por reducción de fugas

Los beneficios por ahorro de energía eléctrica se deben a dos factores: al ahorro de agua que deja de suministrarse y a la reducción de la carga dinámica en los equipos de bombeo.

Para obtener el ahorro de kilowatts-hora por ahorro de agua, se debe estimar primero el número de kilowatts-hora que se consumen en el sistema de agua potable en promedio por cada metro cúbico suministrado (ver la sección 5 del libro). Al multiplicar este valor por el precio del kilowatt-hora y por el volumen de fugas reducibles, se obtiene el beneficio esperado en ahorro de energía eléctrica por la reparación de fugas. Estos resultados se pueden obtener utilizando el formato de cálculo de la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Cálculo de beneficios de reducción de fugas en el ahorro de energía eléctrica

Beneficios por costos ahorrados en energía eléctrica por ahorro de agua de fugas reparadas			
Kilowatts-hora unitario de energía eléctrica en la producción de agua (kW - h /m ³)			0.4
Costo del Kilowatts-hora promedio (\$)			1.05
Tipo de fuga	Agua de fugas reducibles	Números de kilowatts-hora ahorrados	Costo de energía eléctrica ahorrada por reducción de agua de fugas
	m ³		\$
Tomas domiciliarias	4 401.816	1 760.726	1 848.763
Tubería	1 313.427	525.371	551.639
Cajas de válvulas	0	0	0
Otras fugas	0	0	0
Total	5 715.243	2 286.097	2 400.402

El ahorro de energía eléctrica debido a la disminución de la carga dinámica de bombeo se determina utilizando un modelo de simulación hidráulica. Se recomienda consultar el libro *Modelación hidráulica y de calidad del agua en redes de distribución de agua potable*, del MAPAS.

Con los resultados también se calcula la potencia en kilowatts-hora de los equipos de bombeo, con y sin fugas, para obtener con la diferencia, el ahorro de energía eléctrica. Al multiplicar este valor por el costo promedio de kilowatt-hora, se obtienen los beneficios económicos respectivos.

2.1.8.2. Beneficios por ahorro de potabilización por reducción de fugas

Los beneficios en la potabilización del agua suministrada al sistema de distribución, por disminución de fugas, se calcula utilizando los datos de las proporciones de sustancias químicas adicionadas al agua en su proceso de tratamiento.

2.1.9. COSTO Y TIEMPO DE LA REDUCCIÓN Y CONTROL DE FUGAS

Los costos de la reducción y control de fugas se deben calcular con base en las estadísticas propias del organismo operador. Se requiere conocer los siguientes datos sobre fugas en tomas domiciliarias, cajas de válvulas y tubería:

- Caudal unitario de fugas (L/s/fuga)
- Costo unitario de reparación (\$/fuga)
- Volumen total de agua de fugas por reducir para alcanzar el 20 % (m³)

Primero se estima el número de fugas por reparar en tomas domiciliarias, cajas de válvulas y tubería dividiendo el volumen respectivo entre el caudal unitario de fuga, luego se multiplica este número por su costo correspondiente. El costo total de la reducción de fugas para alcanzar 20 por ciento de fugas latentes se calcula sumando los tres costos anteriores.

Es importante mencionar que, además de los costos de eliminación o reducción, deberá con-

siderarse el costo derivado del programa de control de fugas que debe implementar permanentemente el organismo operador para mantener los niveles de fugas logrados.

El valor aproximado de este programa de control de fugas puede determinarse considerando que aproximadamente tiene un costo anual de 35 pesos por cada toma registrada (Costo a 2012).

Las acciones de reducción de fugas deberán realizarse en periodos relativamente cortos, del orden de uno o dos años como máximo, mientras que el control de fugas debe realizarse de manera permanente.

2.2. PROYECTO DE EFICIENCIA FÍSICA

Un proyecto de eficiencia física consiste en diseñar e implementar elementos de eliminación y control de fugas, enmarcados en un programa estratégico de acciones para incrementar la eficiencia del funcionamiento del sistema de agua potable. Los elementos de eliminación de fugas son de tipo estructural si se refieren a trabajos de reparación, sustitución y rehabilitación de tubería y de accesorios.

Los elementos de control son del tipo no-estructural ya que consideran prácticas encaminadas a disminuir el tiempo desde que aparece una fuga hasta que es eliminada.

Dentro de estos trabajos de control de fugas se encuentran el manejo de presiones en la red, la sectorización hidráulica de la distribución

del agua, la implementación de sistemas de macro y micro medición, el desarrollo y actualización del catastro de la red, el monitoreo y análisis estadístico de ocurrencia de fugas, la detección sistemática instrumentada y la capacitación y entrenamiento del personal del organismo operador.

En el proyecto de eficiencia física se definen acciones, componentes, estrategias y recursos para reducir fugas a un nivel mínimo deseado en un sistema de agua potable y mantenerlo así a largo plazo, en condiciones de viabilidad técnica, económica, financiera e institucional.

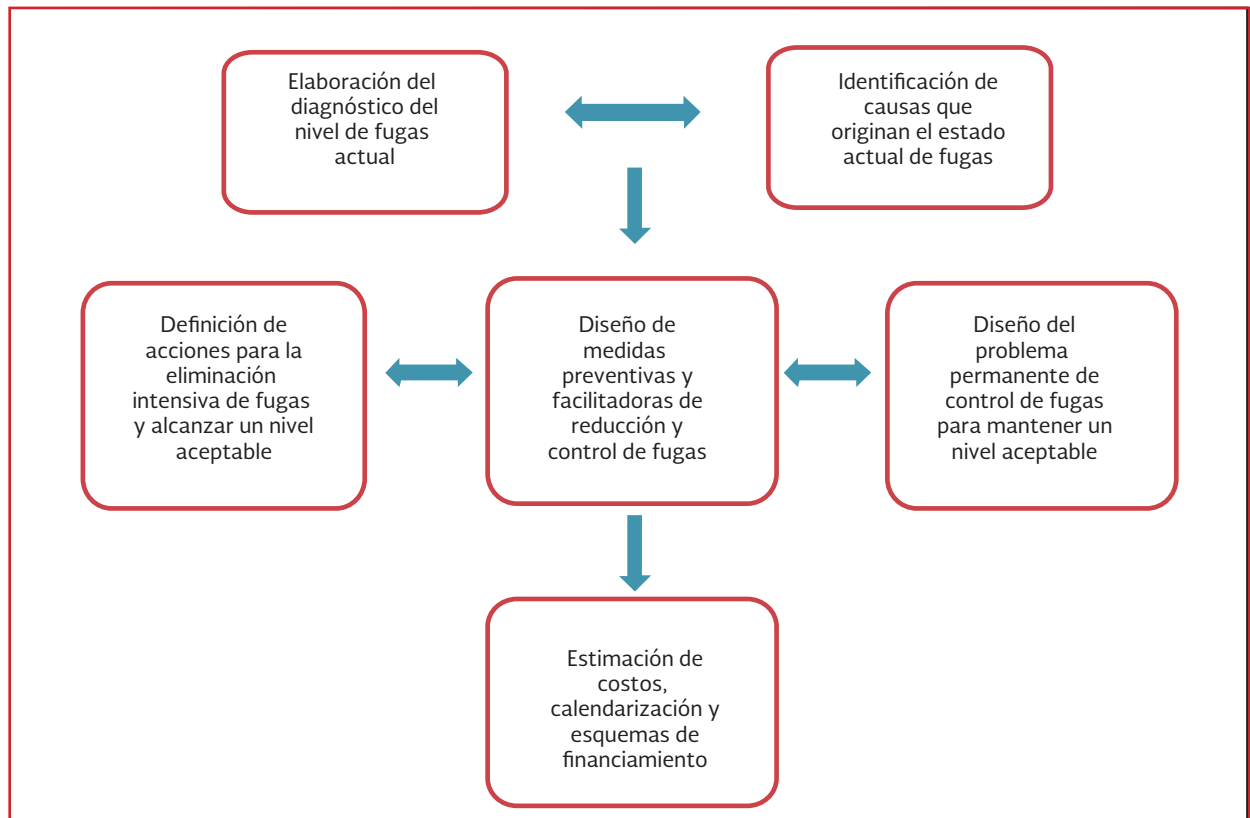
Desde esta perspectiva, el proyecto de eficiencia física se compone de seis bloques de actividades, como se muestra en la Ilustración 2.2.

El punto de partida de actuación depende del avance que cada organismo operador haya desarrollado sobre su proyecto de eficiencia física. No obstante, es preferible verificar y poner en práctica los seis bloques para revisar, actualizar y aumentar la efectividad de las nuevas acciones que se proyecten.

La elaboración del proyecto debe acompañarse de una serie de indicadores que permitan evaluar el impacto de todos los trabajos ejecutados en la etapa de su implementación. La elaboración del proyecto de eficiencia física resulta más acertada mientras más áreas del organismo operador se vean involucradas en su proceso de desarrollo, debido a que estas contribuyen a la identificación de causas y aportan soluciones que no necesariamente son de origen técnico.

Por ejemplo, el problema de las fugas puede deberse en buena parte a que los materiales adqui-

Ilustración 2.2 Bloques de actividades para elaborar un proyecto de eficiencia física



ridos por el departamento de compras no cumplen con la calidad necesaria; o también porque los usuarios no tienen la suficiente comunicación o conocimiento para reportar las fugas.

2.2.1. ELABORACIÓN DE DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE FUGAS

El proyecto de eficiencia física se basa en un diagnóstico actualizado de la situación de fugas en el sistema de abastecimiento. Este diagnóstico se realiza de acuerdo con los lineamientos especificados en la sección 2.1 de este libro.

2.2.2. IDENTIFICACIÓN DE CAUSAS QUE ORIGINAN EL ESTADO ACTUAL DE FUGAS

Con la identificación de las causas que originan el estado actual de fugas se busca evidenciar las carencias y deficiencias de un sistema de agua potable y de su organismo operador, comparando los resultados de la ocurrencia de fugas y los procedimientos que utiliza la institución en su control, frente a un marco de referencia definido como el estado óptimo y eficiente. Esta actividad se realiza en tres partes:

- Obtención del nivel actual de fugas y causas físicas

- Evaluación del estado actual de los subproyectos asociados al control de fugas
- Formulación de árboles de problemas de fugas

2.2.2.1. Obtención del nivel actual de fugas y causas físicas

El cálculo del nivel actual de fugas y las causas físicas de su ocurrencia se basa en el balance de agua, ejecutado según el procedimiento especificado en la sección 2.1, los muestreos de campo de la sección 1.2.7 y las estadísticas históricas con las que cuenta el organismo operador.

El nivel de fugas actual debe ser expresado en porcentaje del volumen suministrado anualmente al sistema de agua potable. Se recomienda clasificarlo en fugas en tomas domiciliarias, fugas en cajas de válvulas y fugas en tubería de la red principal y secundaria.

Adicionalmente, con los resultados del levantamiento estadístico de causas de fugas, se establece el origen físico de la ocurrencia de las fugas; es decir, se determinan los porcentajes de fugas según:

- El lugar del elemento donde ocurrieron (inserciones, cuadros, tubería, estoperos, uniones, coples)
- El tipo de fuga (corte, perforación, rajadura, piezas sueltas)
- El material de la tubería (cobre, PVC, asbesto-cemento, fierro fundido)
- Su variación con la presión
- El diámetro de los tubos y zonas de la red

Algunos ejemplos de cómo presentar este análisis se muestran en la Ilustración 2.3.

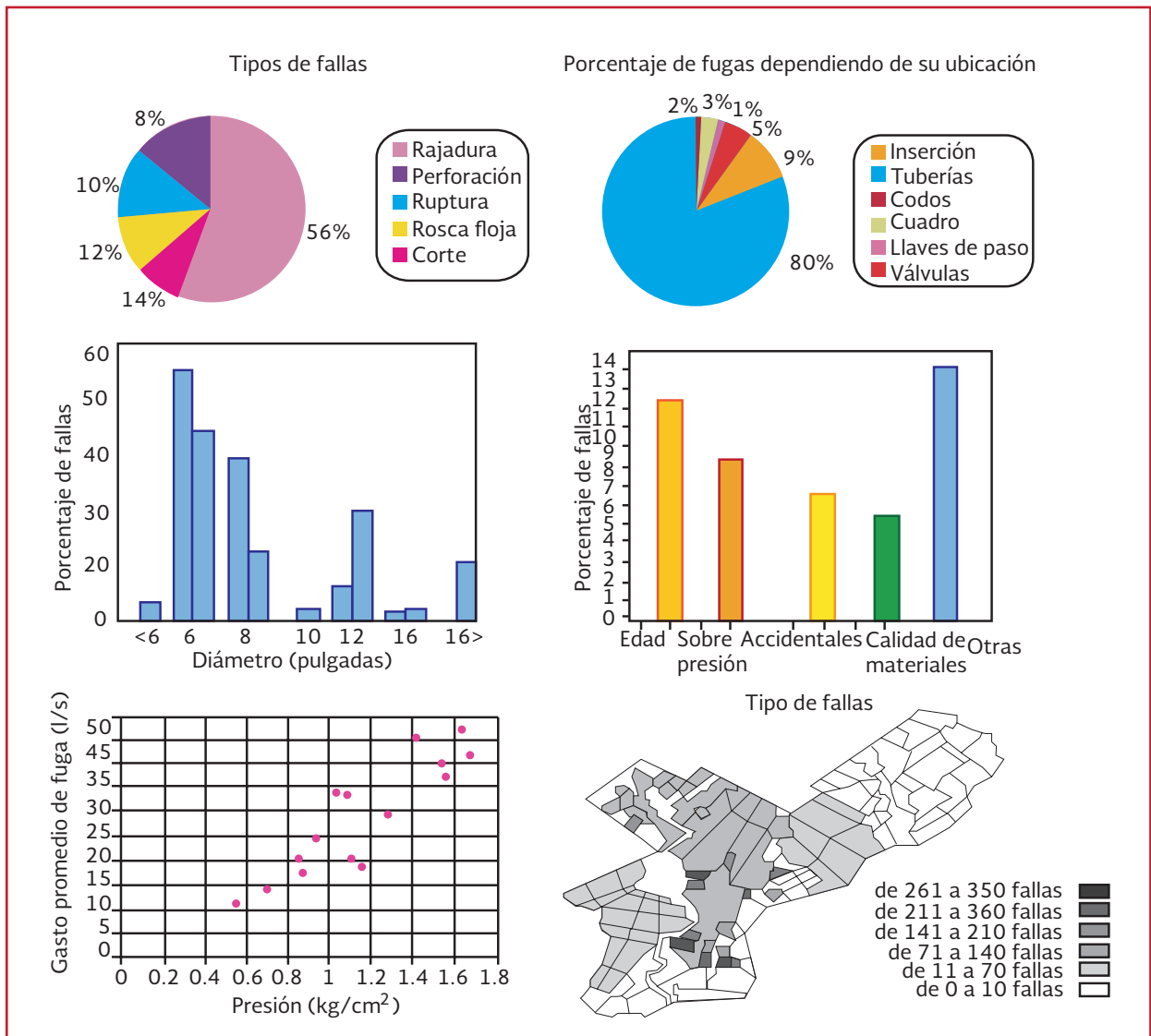
2.2.2.2. Evaluación del estado actual de los subproyectos asociados al control de fugas

Dentro de la estructura operativa y organizacional de un sistema de agua potable existe un conjunto de subproyectos básicos que influyen en el proceso del control de fugas.

Los subproyectos básicos que se relacionan con el control de fugas son:

1. Sistema de macromedición. Su desarrollo ayuda a precisar los volúmenes suministrados a la red en los balances de agua y en las pruebas de distritos hidrométricos para la detección de fugas
2. Catastro de infraestructura hidráulica y de red. Reduce los tiempos de búsqueda y reparación de fugas ya que facilita la localización de tramos y elementos de la red, la realización de pruebas de aislamiento de distritos hidrométricos y la aplicación de estrategias de rehabilitación de tubería
3. Control operacional. Permite la valoración de parámetros hidráulicos en la red, establecer controles automáticos de presión y caudal para disminuir el volumen de fugas y simular con modelos hidráulicos situaciones de reparación de fugas para la toma de decisiones oportuna y confiable
4. Sistema de micromedición. Mejora notablemente la evaluación de volúmenes de consumo por los usuarios para la elaboración del balance de agua; también facilita la detección de fugas intradomiciliarias y la evaluación de sectores y distritos hidrométricos

Ilustración 2.3 Ejemplos de presentación de estadísticas de fugas para identificar causas físicas de su ocurrencial



5. Sectorización de la red. Redistribuye los caudales y presiones en la red y se logra la recuperación de caudales de fuga en forma rentable, rápida y efectiva; además, facilita el monitoreo y control de fugas al realizarlo por zonas aisladas
6. Formación de recursos humanos. Es fundamental la capacitación del personal involucrado en las labores de diagnóstico, detección, reparación y control de fugas para mejorar la efectividad y sustentabilidad de las acciones respectivas
7. Control de suministros y mantenimiento. El control de calidad de los materiales utilizados en la reparación de fugas y los procedimientos constructivos y de mano de obra son determinantes en la recurrencia o no de fugas dentro de la red de distribución
8. Control estadístico. El manejo de estadísticas de fugas permite establecer mejores estrategias en las acciones subsiguientes de reparación y control

9. Comunicación y participación social.
Motiva a los usuarios a tomar conciencia sobre el cuidado del agua y la denuncia de ocurrencia de fugas en el sistema de abastecimiento

Para evaluar la situación de cada uno de estos subproyectos básicos, se comienza por elaborar una serie de encuestas a los encargados de los departamentos del organismo operador relacionados con el control de fugas. No hay un método específico para proceder; sin embargo, se recomienda elaborar una ficha técnica que describa de manera concreta las actividades que desarrolla el área, los recursos y equipos con los que cuenta, etc. En la Tabla 2.8 se muestra un ejemplo del contenido de estas fichas.

Con toda la información recabada en los departamentos del organismo operador, se cons-

truye un esquema que describa gráficamente la interrelación de estos departamentos con el programa de control de fugas, colocándolo como eje central de todo el proceso. Un ejemplo de este esquema se muestra en la Ilustración 2.4.

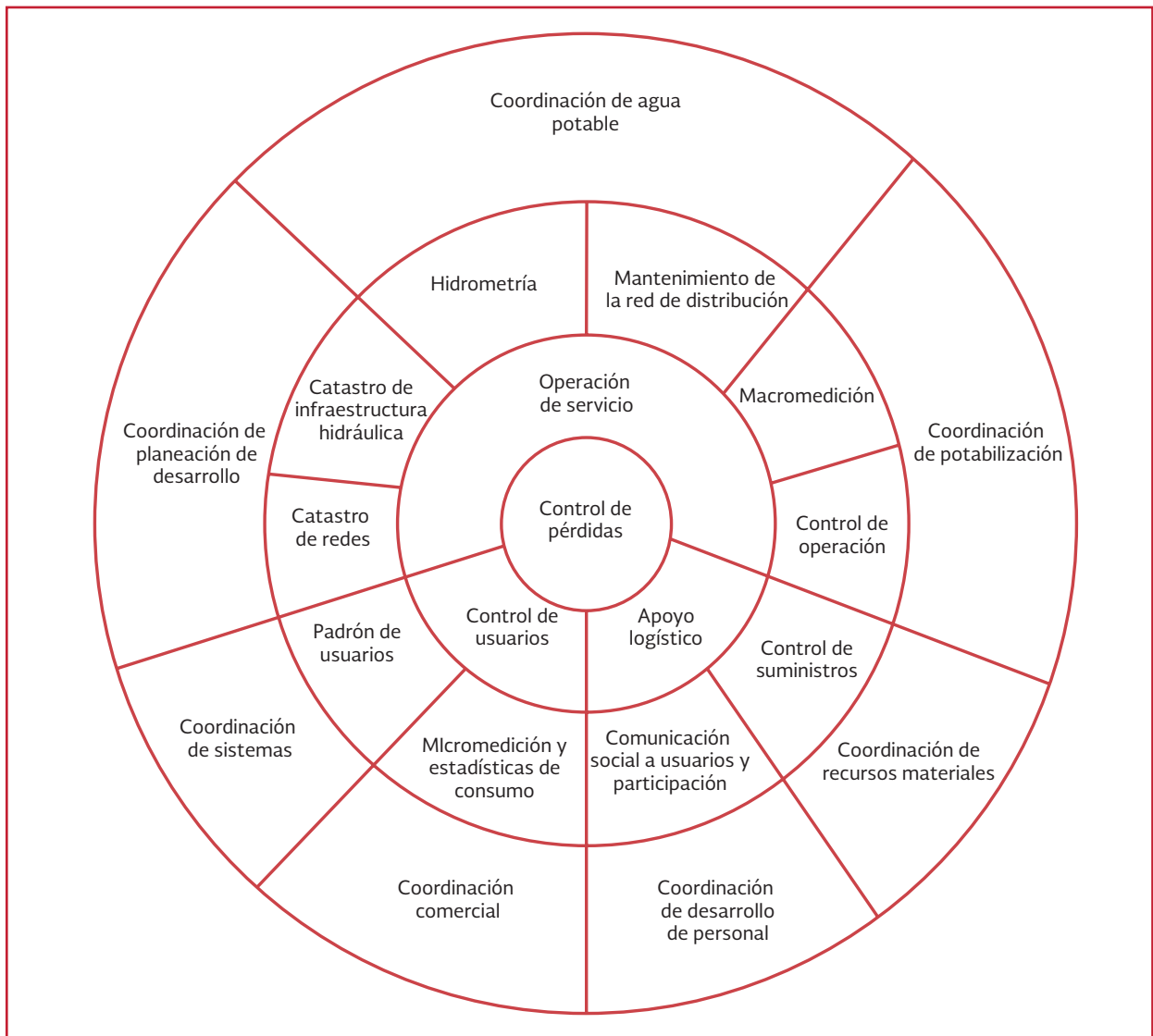
2.2.2.3. Formulación de árboles de problemas de fugas

Después de haber elaborado las fichas técnicas y de haber establecido las causas físicas del nivel de fugas actual, se realizan reuniones con los encargados de los departamentos del organismo operador y el personal que está involucrado con el proceso de control de fugas. El objetivo de dichas reuniones es analizar los problemas que causan las fugas, según el punto de vista y experiencia de cada uno dentro del proceso de administración y operación del siste-

Tabla 2.8 Ficha de mantenimiento de la red de distribución. (Localización, reparación y estadísticas de fugas)

Departamento responsable	Coordinación de Agua Potable
Objetivo	Mantener el mayor tiempo posible un servicio de calidad al usuario, reduciendo al mínimo el tiempo que transcurre entre que surge una fuga y su rehabilitación, a través de la revisión y ajuste de procedimientos de la detección y localización de fugas programada por el organismo operador y de la buena atención y comunicación con los usuarios; además se busca aumentar la eficiencia y eficacia en la conservación y mantenimiento de redes de distribución y tomas domiciliarias.
Situación actual	Existe un área exclusiva para la atención de reportes de usuarios sobre fallas en el sistema, principalmente de fugas. Este área opera de la manera siguiente: a) Se recibe el reporte del problema por parte de usuarios en el centro de diálogo. b) El reporte de usuario es enviado del centro de diálogo al área de mantenimiento y operación de la coordinación de agua potable. c) El encargado del área realiza una evaluación de las acciones a tomar y elabora la orden correspondiente con un folio de identificación. d) Se asigna el trabajo a una cuadrilla para su reparación. e) Una vez que se repara la fuga, la cuadrilla, al terminar su turno, entrega la orden de trabajo ejecutada al área técnica de la coordinación, para su evaluación, archivo, y generación de estadísticas. f) El personal del área hace una evaluación estadística mensual de los trabajos de reparación de fugas realizados en el período, en un sistema de cómputo mediante el cual se pueden hacer consultas por tipo de falla, tipo de tubería, diámetro, etc.; adicionalmente se elaboran gráficas de tendencia.
Recursos humanos y materiales	Para ejecutar estos trabajos, el departamento de mantenimiento y operación cuenta con un ingeniero civil encargado del área, un auxiliar (sobrestante), y 12 cuadrillas (de las 16 existentes en el área). Se cuenta con equipo de radiocomunicación móvil en vehículos y manuales y uno fijo en la oficina central. Se dispone de 14 vehículos (de los cuales 2 son para los encargados y 12 para las brigadas). También se cuenta con herramienta, equipo y material para la reparación.
Comentarios	El organismo tiene un programa intensivo de atención al público sobre fallas en el sistema, pero el área no cuenta con ningún programa de detección de fugas continuo, tampoco con personal capacitado en esta actividad y no dispone de equipos localizadores para llevar a cabo la búsqueda de fugas ocultas. Además, aunque hay un control estadístico de fugas por computadora, el sistema no cuenta con una base de datos gráfica tipo SIG, por lo que la toma de decisiones en cuanto al mantenimiento preventivo y la rehabilitación difícilmente se logra con la información obtenida en ellas.

Ilustración 2.4 Ejemplo de un esquema gráfico de interrelación de los departamentos de un organismo operador con el proceso de control de fugas



ma de agua potable. Con base en las discusiones de esas reuniones, se construye un árbol de problemas para englobar las causas que están originando el nivel de fugas de agua existentes en el sistema de distribución.

Para elaborar el árbol de problemas se aplica el siguiente procedimiento:

1. Hacer una lista de los problemas principales del estado de fugas
2. Formular el problema central
3. Anotar las causas del problema central
4. Anotar los efectos del problema central
5. Elaborar un esquema que muestre las relaciones de causa-efecto en forma de árbol sinóptico
6. Revisar el esquema completo y verificar su validez

En la Ilustración 2.5, se muestran algunos componentes de un árbol de problemas típicos.

Ilustración 2.5 Ejemplo típico de un árbol de problemas de fugas

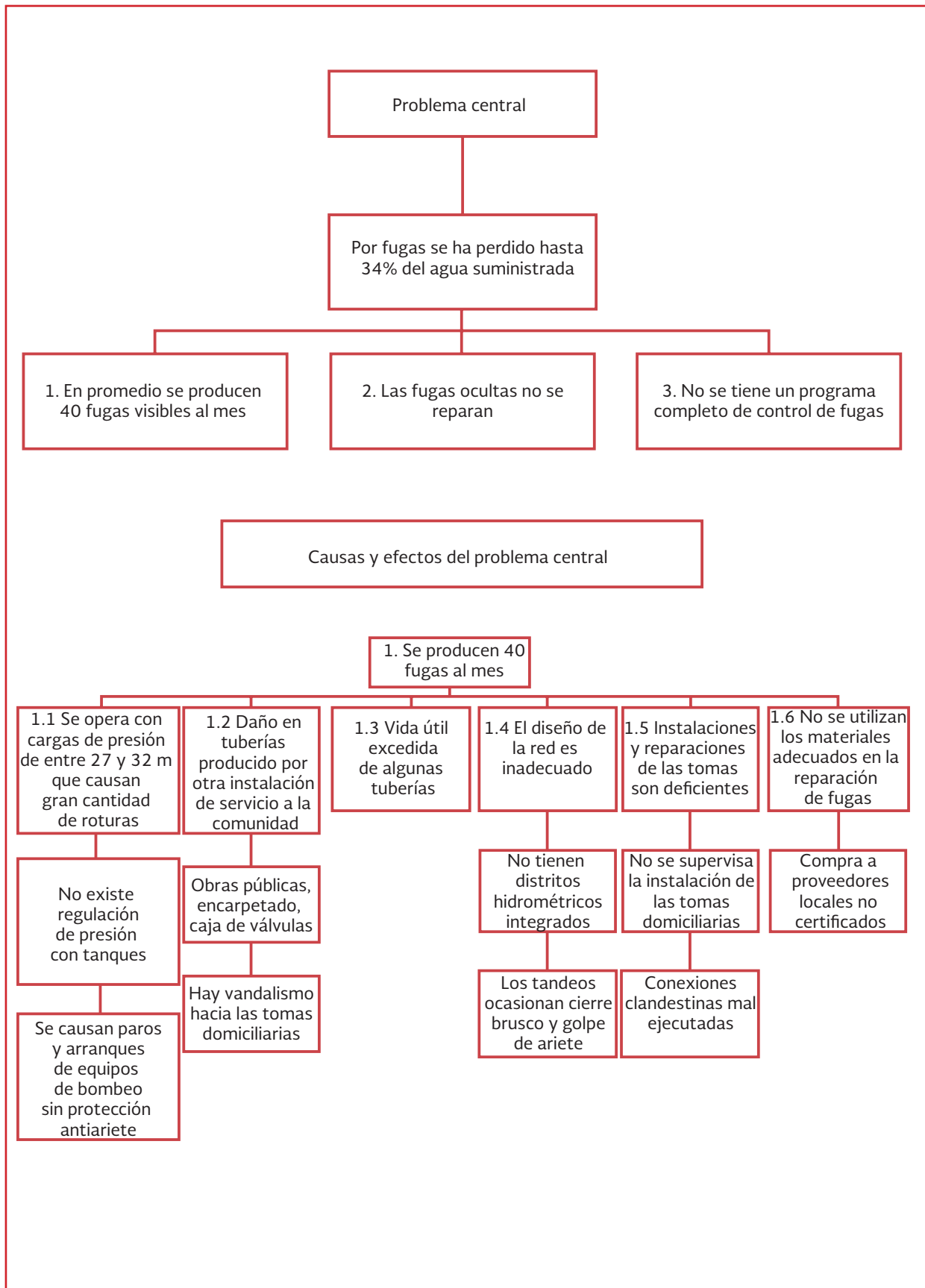
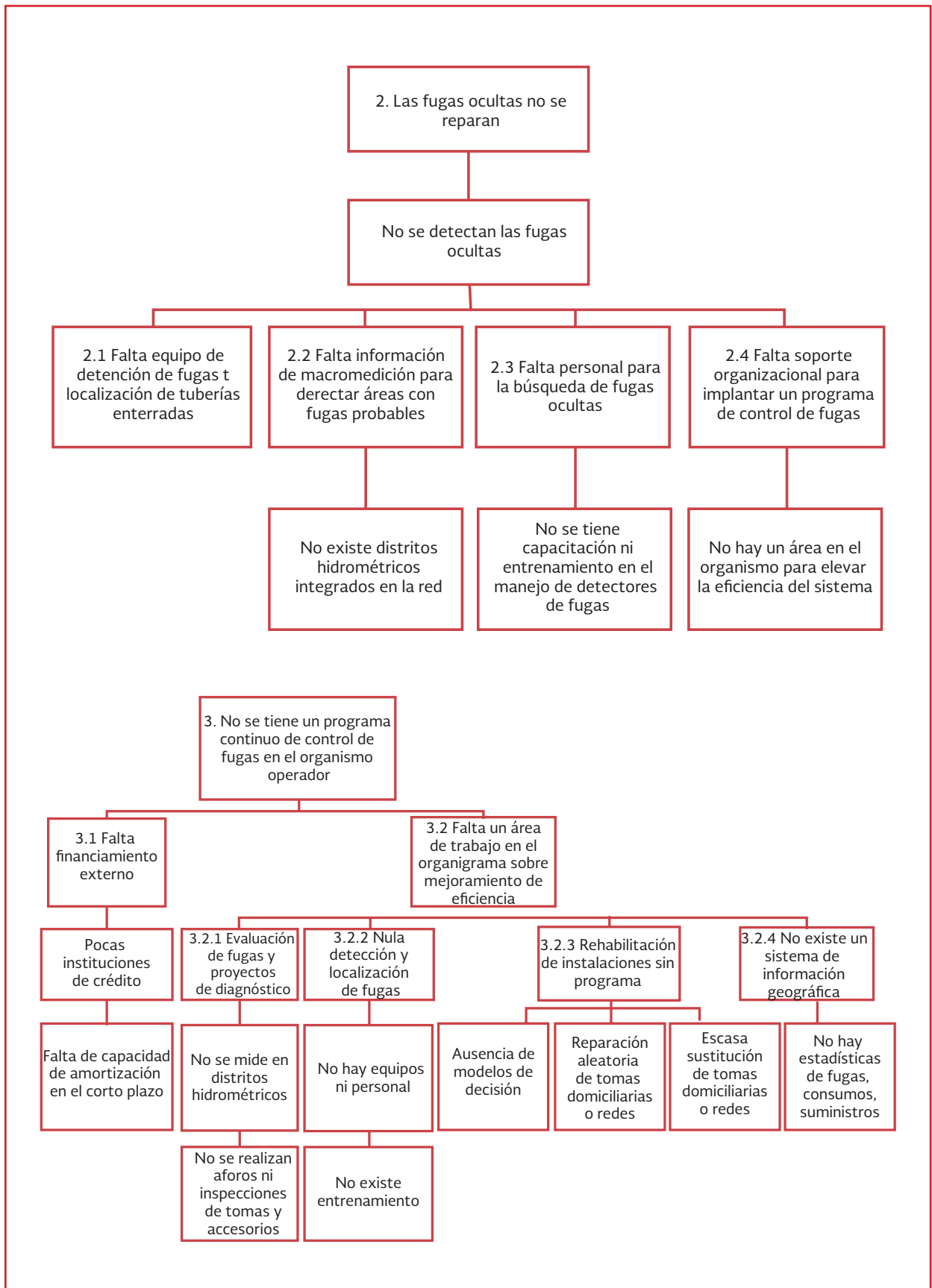


Ilustración 2.5 Ejemplo típico de un árbol de problemas de fugas (continuación)



Al elaborar el árbol de problemas, es importante considerar lo siguiente:

- Un problema no es la ausencia de una solución
- Formular el problema como un estado negativo
- Escribir cada problema en una tarjeta
- Identificar problemas existentes (no los posibles, ficticios o futuros)
- La importancia del problema no está determinada por su ubicación en el árbol de problemas

2.2.3. DISEÑO DE MEDIDAS PREVENTIVAS Y FACILITADORAS DE LA REDUCCIÓN Y CONTROL DE FUGAS

La primera acción que se debe ejecutar para llevar a cabo el control de fugas en un sistema de agua potable es conformar un grupo de personas dentro del organismo operador designado exclusivamente a esta actividad. Este grupo tendrá una organización técnica que le permita atender oportunamente la reparación de cualquier fuga que se produzca en las instalaciones del sistema de abastecimiento.

Las principales funciones técnicas de este grupo de control de fugas son:

- Establecer normas y procedimientos del sistema de mantenimiento de redes
- Definir, analizar y consolidar el sistema de información y estadísticas
- Conducir la adquisición de nuevas tecnologías para la localización y reparación de fugas
- Coordinar la elaboración de manuales de procedimientos para el control de fugas

- Adecuar el área de mantenimiento de redes a los nuevos procedimientos descritos en el presente libro
- Establecer los programas de capacitación del personal
- Elaborar informes de avance, estadísticas y monitoreo de indicadores del programa de control de fugas
- Establecer medidas correctivas y preventivas de rehabilitación de tubería y reparación de fugas
- Actualizar periódicamente el diagnóstico de fugas y su esquema de control

En la Tabla 2.9 se muestra un ejemplo de la estructura de un grupo de trabajo de nueva creación para el control de fugas.

Una vez diseñada la estructura del grupo de trabajo, se determinan las medidas que prevengan y faciliten la reducción y el control de fugas, y que estarán integradas por los subproyectos básicos mencionados en la sección 2.2.2.2. En esta etapa del proyecto de eficiencia física se diseñan todos los elementos que solventarán las deficiencias actuales de dichos subproyectos básicos.

Cada subproyecto básico será diseñado individualmente, pero con una visión integral del organismo operador. Su diseño debe entonces formar parte de un programa de control de fugas completo y la implementación de cada subproyecto básico conducirá a estabilizar un nivel de fugas óptimo y encontrar la autosuficiencia administrativa y financiera correspondiente.

En la Ilustración 2.6 se muestra un diagrama que indica el procedimiento que se sigue para diseñar un subproyecto básico. La CONAGUA (2005) propuso un catálogo detallado de los subproyectos que puede ser útil para orientar su diseño.

Tabla 2.9 Ejemplo de la estructura de un área de nueva creación para el control de fugas

Nombre	Se propone denominar a la nueva área con alguno de los nombres siguientes: "Eficiencia de operación" o "Uso eficiente del agua" o "Eficiencia del servicio", entre otros.
Misión	Crear y adaptar técnicas para mantener niveles de fugas aceptables y rentables en el sistema de agua potable
Estructura y funciones	Consiste en tres departamentos: a) Sistema de información; encargado de mantener el SIG (Sistema de Información Geográfica), establecer estadísticas y generar modelos de decisión b) Detección y localización de fugas; desarrollar balances físicos y económicos, localizar fugas ocultas y visibles, implantar mecanismos, tecnologías para la localización de fugas c) Reparación de fugas; eliminar y aforar fugas, evaluar causas de fallas, costos y estrategias para mejorar la recurrencia de fugas y establecer la comunicación con los usuarios
Recursos humanos y materiales	Se contempla la existencia de un jefe por cada departamento, dos técnicos auxiliares, dos brigadas de detección de fugas ocultas, una brigada de hidrometría y una brigada de macro-medición; asimismo, se debe tener dos detectores de fugas del tipo electroacústico indirecto, un equipo ultrasónico portátil de medición de caudal, herramientas menores para aforo de fugas, dos equipos de sustitución de tomas domiciliarias, libros y manuales, dos vehículos de transporte ligero (camionetas o trimotos), un espacio con muebles y equipo de oficina, tres equipos de cómputo, software SIG y software, materiales audiovisuales y sobre todo disponer de un presupuesto fijo anual para efectuar sus programas de trabajo
Presupuesto anual	Se calcula una inversión inicial de 1550 000 pesos y para sueldos, materiales e insumos un monto de 665 000 pesos por año (Precios al año 2012).

2.2.4. DEFINICIÓN DE ACCIONES PARA LA ELIMINACIÓN INTENSIVA DE FUGAS PARA ALCANZAR UN NIVEL ACEPTABLE

Las acciones para eliminar en forma intensiva las fugas se aplican cuando el nivel rebasa el 20 por ciento del volumen suministrado al sistema. Este valor se obtiene del balance de fugas descrito en la sección 2.1 de este libro.

La actividad de eliminación intensiva de fugas consiste en localizar las fugas y repararlas a través de la implementación de medidas urgentes y de corto plazo. Es importante en esta sección del libro, analizar el origen de las fugas y las técnicas de localización y reparación existentes.

2.2.4.1. Origen de las fugas y técnicas de localización y reparación

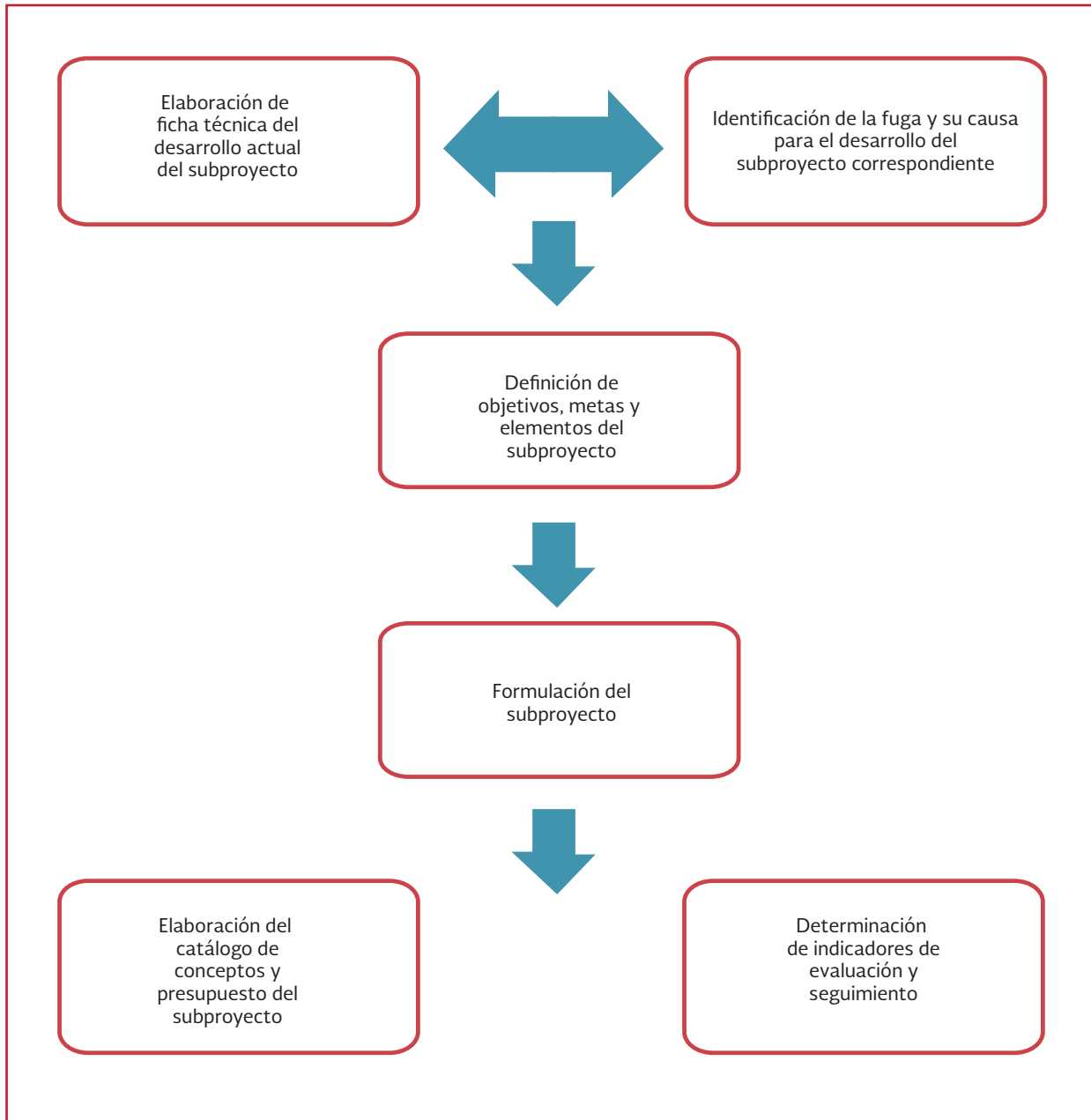
Una fuga es agua que se escapa del sistema de abastecimiento de manera descontrolada por

causa de roturas, uniones abiertas, fisuras y malas reparaciones en tubería y tanques. Los derrames en los depósitos, los vaciados de tubería, los desfuegos, el purgado de máquinas, en definitiva, toda el agua que se escapa y que nadie utiliza es considerada una fuga. Las causas de fugas se muestran en la Ilustración 2.7.

Las fugas pueden ser visibles u ocultas. Las visibles brotan a la superficie y humedecen el terreno. La mayoría de estas fugas las reportan los usuarios, fontaneros o personal del organismo operador y normalmente duran poco tiempo (de dos horas a siete días), dependiendo de la capacidad del organismo operador para realizar la reparación.

Las fugas ocultas se filtran en el suelo y no se sabe dónde están. A veces estas fugas entran a los drenajes, cajas de válvulas y son difíciles de encontrar. Muchas fugas ocultas son pequeñas cuando ocurren, pero crecen con el tiempo. Así, el promedio de vida de este tipo de fugas puede ser de varias semanas, meses y en algunos casos años.

Ilustración 2.6 Diagrama de diseño de subproyectos básicos para el control de fugas



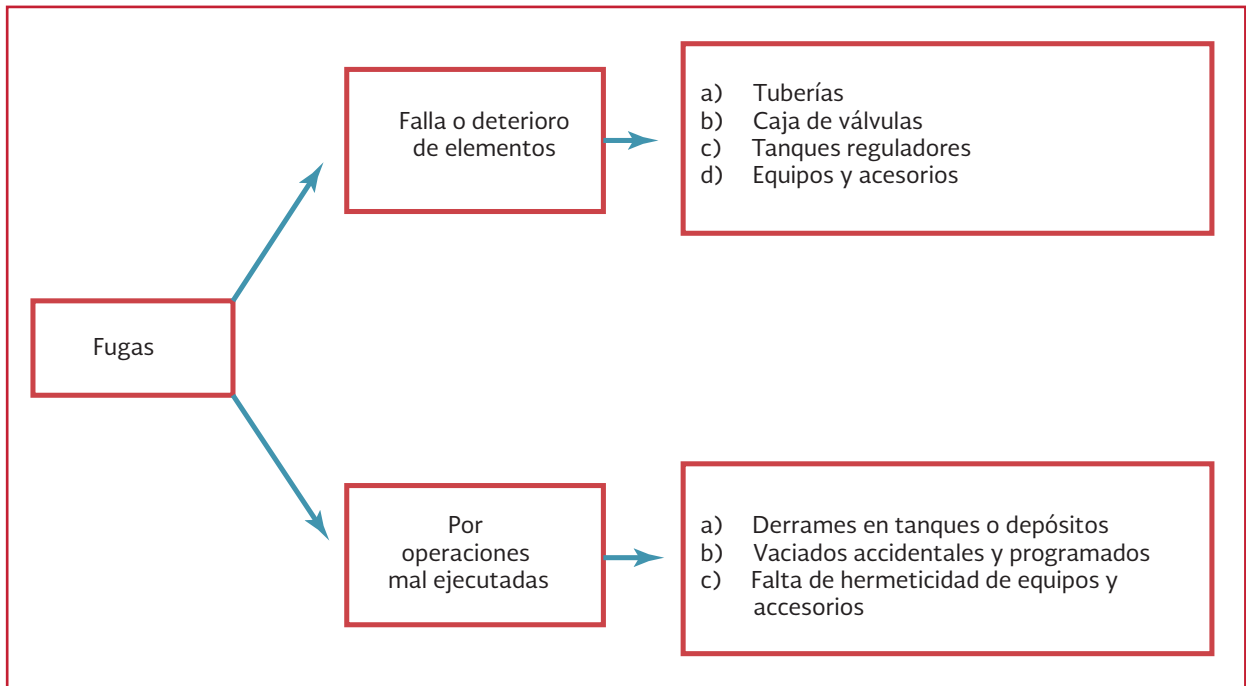
En general, es correcto suponer que este tipo de fugas pueden existir hasta un año en zonas de la ciudad relativamente nuevas, de dos a cinco en áreas seminuevas y de diez años o más en zonas muy antiguas.

Las fugas se presentan en distintas formas. Algunas de ellas ocurren en los accesorios o en el

cuerpo de la tubería, y pueden ser rajaduras y agujeros. Las rajaduras se dividen en longitudinales y transversales, dependiendo de la causa de la falla, como se observa en la Ilustración 2.8.

Las fugas más comunes en tomas domiciliarias ocurren por fallas en la inserción con la tubería de distribución: en los codos, uniones y en el

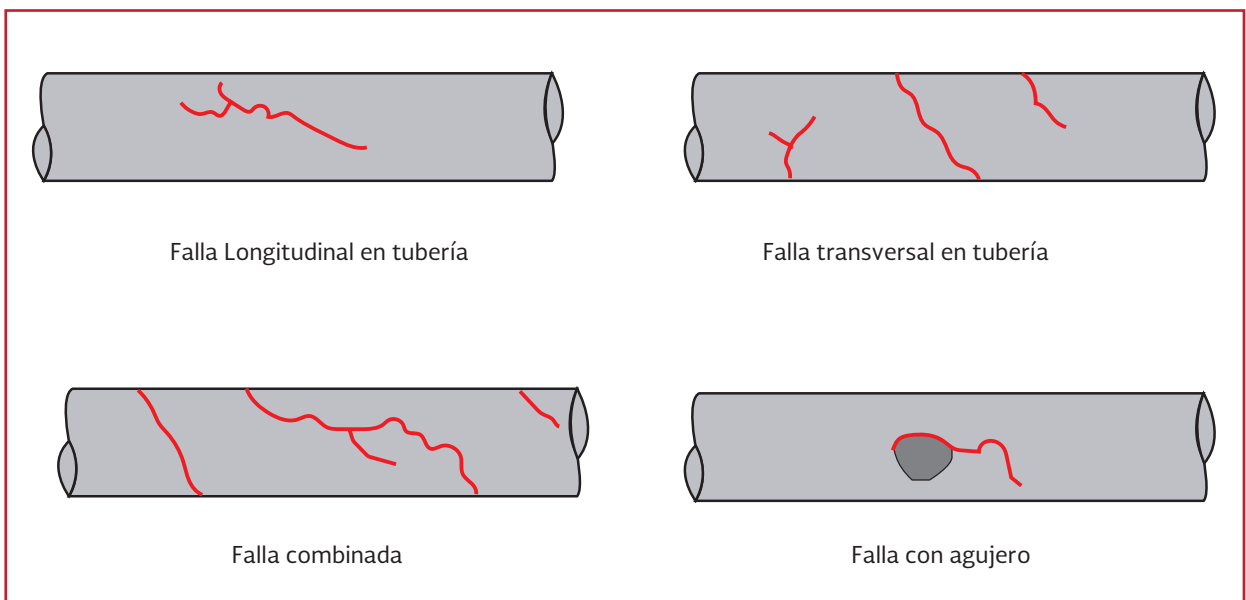
Ilustración 2.7 Clasificación de fugas en sistemas de agua potable



mismo cuerpo de la tubería cuando el material es de muy baja calidad. En las cajas de válvulas la falla más común se encuentra en la base de su volante y en las juntas.

En los tanques elevados, las fugas ocurren debido al agrietamiento de las estructuras o al rebose de las mismas. Generalmente, son de gran magnitud, pero muy esporádicas, por lo que me-

Ilustración 2.8 Tipos de fugas en tubería



rece especial atención la inspección y el mantenimiento de las válvulas de control del nivel en el tanque. Dentro de los domicilios, las fugas se presentan principalmente en los herrajes de los inodoros. Las fugas se pueden presentar cuando ocurren los siguientes fenómenos:

- Presión alta del agua dentro de la tubería
- Corrosión externa en tubos metálicos debido al contacto con el suelo
- Corrosión interna por la mala calidad del agua que transporta el tubo
- Paso de vehículos pesados sobre tubos a poca profundidad
- Mala calidad de los materiales y accesorios de los tubos
- Mala calidad de la mano de obra con que se instalan o reparan los tubos
- Tubería con muchos años de antigüedad
- Movimientos del suelo (sismos)

Actualmente, localizar fugas ocultas se basa principalmente en la detección del sonido que producen. Al escapar el agua a presión, genera vibraciones en el punto de escape y produce sonidos en un intervalo de frecuencia de entre 350 y 2000 Hz (ciclos por segundo).

Los sonidos ambientales se encuentran en el intervalo de hasta 350 Hz. En tubería metálicas el sonido se transmite mejor que en las que no lo son. Las presiones altas facilitan la localización ya que al salir el agua con mayor velocidad, se produce un sonido que se propaga con mayor intensidad. Una fuga pequeña (orificio o grieta) tiene un sonido agudo de alta frecuencia y una fuga grande (tubería rota o junta defectuosa), un sonido grave de poca intensidad y baja frecuencia. En suelos porosos se

disipa más fácilmente el sonido de la fuga, que en suelos compactos.

Para amplificar el sonido de las fugas se fabrican instrumentos electrónicos con una gran diversidad de diseños y características. Los equipos detectores de fugas se pueden agrupar de la siguiente manera:

1. Equipos de detección directa. Son aquellos que requieren un punto de contacto con las tuberías, tomas domiciliarias o válvulas de la red. Comúnmente detectan el sonido de la fuga que viaja a través de estos elementos. Dentro de esta clasificación se encuentran los geófonos de punta y correladores. En la Ilustración 2.9 se muestran fotografías de estos detectores de fugas
2. Equipos de detección indirecta. Estos equipos no necesitan contacto con ningún elemento de la red para funcionar. Normalmente detectan el sonido que viaja por el suelo donde se encuentra enterrada la tubería. Dentro de esta categoría están los geófonos de piso. En la Ilustración 2.10 se muestra una fotografía de este tipo de detector de fugas

La detección de fugas debe realizarse preferentemente en la noche debido a que durante el día, principalmente en las áreas urbanas, los ruidos ambientales interfieren y se mezclan con el de las fugas, lo cual dificulta su localización.

La reparación de fugas puede llevarse a cabo de dos formas: mediante rehabilitación del elemento dañado observando las especificaciones de instalación y materiales o mediante la sus-

Ilustración 2.9 Correlador localizador de fugas



Ilustración 2.10 Geófono localizador de fugas



titución del tramo dañado. La decisión de reemplazar (rehabilitación) o reparar la tubería o los componentes del sistema se basa en factores como: presiones en la red, tipo de terreno, vida útil de la tubería, tipo y calidad del material, diseño del sistema, factor de rugosidad de la tubería, operación de la red, programas de mantenimiento y registros históricos de fugas.

Un reemplazo es justificado cuando se tienen niveles elevados de:

- Frecuencia de daños

- Corrosión externa en las tuberías, tomas y piezas especiales
- Costos elevados de reparación de los daños
- Daños severos en la red principal

Una reparación es justificada cuando existe:

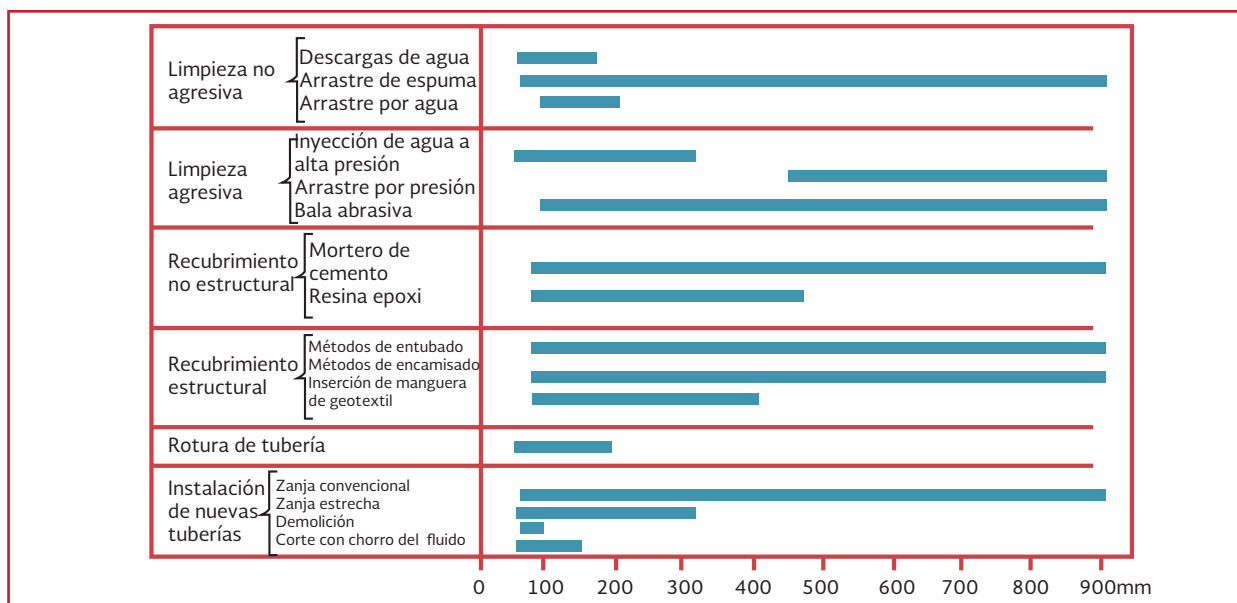
- Baja de presión no significativa en la línea
- Daños locales pequeños en la red principal y en tomas domiciliarias
- Baja frecuencia de daños

Existen varios métodos y tecnologías comerciales para rehabilitar y renovar tubería (Cabrera y Cabrera, 2012), entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Limpieza no agresiva: descargas de agua, arrastre con espuma y aire
- Limpieza agresiva: chorros de agua a altas presiones, rascado a presión, bala abrasiva
- Revestimiento no estructural: revestimiento de mortero de cemento y resina epóxica
- Revestimiento estructural: entubado, encamisado y manguera de geotextil
- Restitución de tubería: empuje de tubería vieja por tubería nueva con rotura
- Instalación de tubería nueva: restitución de tubería vieja por zanjeado

En la Ilustración 2.11 se presenta un resumen de los rangos de diámetros para los que resultan efectivos ciertos métodos.

Ilustración 2.11 Rango de diámetros de tubería que determinan si los métodos de rehabilitación son efectivos



2.2.4.2. Procedimiento para localizar y reparar fugas en tomas domiciliarias

La detección y localización de fugas en tomas domiciliarias se basa en la evaluación de fugas por muestreo estratificado, jerarquizando las zonas con mayor incidencia de fugas. Si se trata de fugas visibles, la localización se lleva a cabo con un programa de inspección en ruta; en cambio, si son fugas ocultas será necesario aplicar técnicas de caída de presión y localización con equipos electroacústicos de contacto e indirectos. La reparación se puede realizar excavando y sustituyendo el tramo dañado, mientras que para la sustitución de tomas es mejor emplear equipos de tensión o topes, sin excavar. También, se deben elaborar las estadísticas respectivas y hacer reportes para la toma de decisiones.

Se elabora un plan de inspección, jerarquizando las colonias o zonas: primero en aquellas donde existan más fugas visibles y después

en donde haya más fugas ocultas, considerando también como prioritarias las zonas donde exista mayor presión de agua en la red. Se organizan los recorridos en función de los horarios de suministro, los problemas de tráfico y ruido, la sincronización con las cuadrillas de reparación, etc., y se elaboran los formatos de campo y captura de información.

Se adquieren localizadores de fugas del tipo electroacústico indirecto y de contacto y se elaboran los formatos de levantamiento de datos y aviso a usuarios. Después se ejecuta el programa de detección y localización de fugas, utilizando los equipos localizadores de fugas y los manómetros para registro de presión; se dejan marcados los lugares con posibles fugas y se entregan los reportes a las cuadrillas de reparación.

Es necesario elaborar estadísticas de fallas y aforar las fugas, calcular los indicadores siguientes y evaluar periódicamente:

1. Porcentaje de tomas inspeccionadas, que es igual al número de tomas inspeccionadas entre el número de tomas por inspeccionar
2. Porcentaje de ocurrencia de fugas en tomas, que es igual al número de tomas con fuga encontradas entre el número de tomas inspeccionadas
3. Porcentaje de ocurrencia de fugas por tipo de material, el lugar y tipo de falla
4. Gasto unitario de fuga en toma domiciliaria

2.2.4.3. Localización y reparación de fugas en cajas de válvulas

La detección y localización de fugas en cajas de válvulas se hace con base en una inspección vi-

sual de todas las cajas de válvulas de la red de distribución. La reparación se realiza sustituyendo la válvula dañada, o bien cambiando algunas piezas o empaques de la misma. Se deben elaborar las estadísticas respectivas y hacer reportes para la toma de decisiones. Hay que estar preparado para localizar cajas de válvulas cubiertas con pavimento.

La localización y reparación de fugas en caja de válvulas comienza consultando los resultados estadísticos de ocurrencia de fugas con el fin de estimar los posibles porcentajes de fugas por reducir. Se recopilan planos de la red de distribución ubicando las cajas de válvulas. Se elabora un plan de inspección, jerarquizando las cajas de válvulas, primero las más antiguas, después las de mayor diámetro y por último en las que se tenga mayor presión de agua en la red.

Se organizan los recorridos en función de los horarios de suministro, los problemas de tráfico y ruido, la sincronización con las cuadrillas de reparación, etc., y se elaboran los formatos de campo y captura de información. Se adquieren herramientas para destapar cajas, localizadores de objetos metálicos enterrados y se elaboran formatos de levantamiento de datos.

Se detectan y localizan las fugas en cajas de válvulas enterradas utilizando equipos localizadores de objetos metálicos; se dejan marcadas las cajas con fugas y se entregan los reportes a las cuadrillas de reparación.

Es necesario elaborar estadísticas de fallas y aforar las fugas. Se calculan los indicadores siguientes y se evalúan periódicamente:

1. Porcentaje de cajas inspeccionadas, que es igual al número de cajas inspec-

cionadas entre el número de cajas por inspeccionar

2. Porcentaje de ocurrencia de fugas en cajas de válvulas, que es igual al número de cajas con fuga entre el número de cajas inspeccionadas
3. Porcentaje de ocurrencia de fugas por tipo de válvula, el lugar de la fuga y tipo de falla
4. Gasto unitario de fuga en caja de válvula

2.2.4.4. Localización y reparación de fugas en tubería de la red principal y secundaria y en tanques

La detección y localización de fugas en tubería de la red principal y secundaria se hace jerarquizando las zonas con mayor incidencia de fugas. Si se trata de fugas visibles, la localización se lleva a cabo mediante un programa de inspección visual; en cambio, si son fugas ocultas será necesario aplicar técnicas de caída de presión, localización con equipos electroacústicos de contacto e indirectos y en ocasiones, con correlacionador electrónico. La reparación se realiza colocando abrazaderas metálicas en el tramo dañado. Se deben elaborar las estadísticas respectivas.

La localización y reparación de fugas en tubería de la red principal y secundaria se realiza de acuerdo con los siguientes puntos:

1. Se consultan las estadísticas de ocurrencia de fugas con el fin de estimar los posibles porcentajes de pérdidas de agua por reducir
2. Se analizan los resultados estadísticos de la ocurrencia de fugas por zona de la ciudad

3. Se elabora un plan de inspección, jerarquizando las colonias o zonas. Se priorizan aquellas donde existan más fugas visibles y después en donde existan más fugas ocultas, contemplando también como prioritarias las zonas donde exista mayor presión de agua en la red y donde la tuberías sean más antiguas
4. Se organizan los recorridos en función de los horarios de suministro, los problemas de tráfico y ruido, la sincronización con las cuadrillas de reparación, etc., y se elaboran los formatos de campo y captura de información
5. Después se ejecuta el programa de detección y localización de fugas, se dejan marcados los lugares con posibles fugas y se entregan los reportes a las cuadrillas de reparación. Es necesario elaborar estadísticas de fallas y aforar las fugas con métodos de uso común

Se calculan los indicadores siguientes y se evalúan periódicamente:

1. Porcentaje de longitud de tubería inspeccionada es igual a la longitud de tubería inspeccionadas entre la longitud total de tubería por inspeccionar
2. Porcentaje de ocurrencia de fugas en tubería es igual al número de fugas encontradas entre el número total de fugas en el sistema
3. Porcentaje de ocurrencia de fugas por tipo de material, lugar de la fuga y tipo de falla
4. Gasto unitario de fuga en tubería principal o secundaria

2.2.5. DISEÑO DEL PROGRAMA PERMANENTE DE CONTROL DE FUGAS PARA MANTENER UN NIVEL ACEPTABLE

El objetivo del control de fugas es reducir al mínimo el tiempo que transcurre entre el surgimiento de una fuga y su eliminación, a través de la revisión y ajuste continuo de procedimientos y acciones, con el fin de aumentar la eficacia de la conservación y mantenimiento de la red de distribución.

El control de fugas de agua es una actividad continua en tiempo y espacio donde se establecen los procesos para coordinar las acciones de localización y eliminación de fugas, apoyándose en un monitoreo continuo de la red, los reportes de fugas detectadas por usuarios, programas de búsqueda sistemática de fugas ocultas, elaboración periódica de balances y muestreos de evaluación, etcétera.

La formulación del proyecto de control de fugas se realiza de la manera siguiente:

1. Con un muestreo de campo y datos estadísticos recientes se elabora una evaluación de pérdidas y un balance del agua con el fin de estimar los porcentajes de agua por reducir en cada rubro
2. Se recopila información y datos para la reducción de fugas, como por ejemplo, personal, presupuesto, procedimientos, equipos, resultados e indicadores
3. Se determinan las causas de la ocurrencia

de pérdidas de agua señalando los problemas principales, los equipos y recursos humanos necesarios, las acciones requeridas a corto y mediano plazos

4. Se establece un programa de control de fugas para definir las actividades generales, priorizadas y calendarizadas, con sus costos y beneficios, e indicando sus fuentes de financiamiento
5. Se ejecutan las acciones a corto plazo, como la implantación de un departamento de control de fugas, módulos de atención al público para reporte de fugas, equipos urgentes, capacitación al personal, etcétera
6. Después se inicia el proceso de eliminación de pérdidas e implantación del proceso coordinado con las acciones de control
7. Se ejecuta el control de estadísticas y el monitoreo de información
8. Se elabora el balance del agua cada año y se evalúan periódicamente los indicadores siguientes:
 - a. Porcentaje de pérdidas potenciales igual al volumen de pérdidas entre el volumen producido
 - b. Relación beneficio-costos de la reducción y control igual al costo de acciones entre costo del agua recuperada

En la Tabla 2.10 se presentan las actividades específicas que se deben desarrollar en un programa de control de fugas de sistemas de agua potable.

Tabla 2.10 Secuencia de actividades para implementar un programa de detección de fugas (modificado de CONAGUA, 2009)

Prioridad	Acción específica	Costo unitario (\$/toma registrada)
1	Conformación de los grupos de personal técnico, administrativo y de campo que desarrollarán las actividades de mejora de eficiencia física (control de fugas) con equipos de oficina, cómputo, cuadrillas de campo y herramientas	1.75
2	Implantación de los procedimientos de recepción, análisis, canalización y seguimiento de los reportes de fugas	1.39
3	Gestión ante la compañía de telefonía para la asignación de números telefónicos fácilmente memorizables para atender reportes del público	0.19
4	Diseño, elaboración e implantación de formatos de campo y de recepción de reportes	0.58
5	Promoción de la colaboración del público para el reporte de fugas mediante publicidad, procedimientos y acuerdos de coordinación	0.68
6	Establecimiento de una reserva mínima de materiales de uso frecuente para reparación	10.47
7	Mantenimiento y reposición de equipos, herramientas y vehículos	3.7
8	Programa de pruebas de muestreo en campo para identificar ocurrencia de fugas	1.96
9	Programa de búsqueda sistemática de fugas visibles en tomas domiciliarias de acuerdo con las estadísticas de fugas	1.54
10	Programa de evaluación sistemática del estado de válvulas	1.56
11	Programa de búsqueda sistemática de fugas visibles en tubería de la red principal y secundaria de acuerdo con las estadísticas de fugas	1.06
12	Adquisición de equipos detectores de fugas y localización de metales	5.50
13	Programa de búsqueda sistemática de fugas ocultas en tomas domiciliarias y tubería principal	1.59
14	Implantación de un sistema de monitoreo en tiempo real y una base de datos, vinculada a un sistema de información geográfica para búsqueda y detección de fugas ocultas	2.89

3

EFICIENCIA HIDRÁULICA

3.1. DIAGNÓSTICO DE EFICIENCIA HIDRÁULICA

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. 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 algunos parámetros sobre la disponibilidad espacial y temporal del agua a los usuarios. Algunos de estos parámetros son:

- Consumo unitario de los usuarios, L/(hab d)
- Dotación, L/(hab d)
- Continuidad del servicio de agua (h/d)
- Déficit entre el caudal de agua disponible en la red y el caudal de agua requerido por los usuarios (\pm por ciento)
- Presión media del agua en la red de distribución (kg/cm^2)

A continuación se dan algunas recomendaciones para la estimación de cada uno de estos parámetros.

3.1.1. CONSUMO UNITARIO DE LOS USUARIOS

El consumo unitario se clasifica en doméstico y no-doméstico. El consumo unitario doméstico es un parámetro que indica la cantidad de agua que utiliza un habitante común en un día típico promedio en una población. El cálculo se consigue aplicando la Ecuación 3.1.

$$Cu_d = \frac{C_d}{n_p} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

donde:

- Cu_d = consumo unitario doméstico, L/(hab día)
- C_d = consumo total doméstico diario (L/día)
- n_p = número de habitantes servidos de la localidad

En el libro *Datos Básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado* se presentan los consumos unitarios domésticos, clasificados por tipo de usuario y en función de la temperatura media anual de la localidad (clima). Estos valores se reproducen en la Tabla 3.1 y la Tabla 3.2, y pueden ser utilizados para comparar los datos obtenidos en una localidad, o bien para el diseño cuando no se cuenta con estadísticas al respecto.

Tabla 3.1 Promedio del consumo de agua potable estimado por clima predominante

Clima	Consumo L/(hab día)			Valor medio por clima
	Bajo	Medio	Alto	
Cálido húmedo	198	206	243	201
Cálido subhúmedo	175	203	217	191
Seco o muy seco	184	191	202	190
Templado o frío	140	142	145	142

Tabla 3.2 Promedio del consumo de agua potable estimado según nivel socioeconómico y clima

Clima	Nivel socioeconómico		
	Bajo	Medio	Alto
	m³/mes		
Cálido húmedo	24	25	28
Cálido subhúmedo	20	23	26
Seco o muy seco	22	22	22
Templado o frío	15	16	14

El cálculo del consumo unitario doméstico se obtiene mediante un promedio ponderado en función de los porcentajes de clases socioeconómicas existentes en la localidad en estudio.

El consumo unitario no doméstico es la relación de la suma de consumos comerciales, industriales y especiales, en un día típico promedio, dividido entre el número de habitantes de una localidad. La intención del cálculo de este consumo unitario no doméstico es conocer qué proporción de la cantidad de agua suministrada a los usuarios no domésticos corresponde a cada habitante de la población.

3.1.2. DOTACIÓN

La dotación es la cantidad de agua asignada a cada habitante, considerando todos los consumos de los servicios y las pérdidas en la red en un día medio anual; sus unidades están dadas en L/hab/día.

La dotación se obtiene a partir de un estudio de Balance de Agua (Sección 2.1 del libro),

dividiendo la suma del consumo total, que incluye servicio doméstico, comercial, industrial y de servicios públicos, más las pérdidas de agua, entre el número de habitantes de la localidad. También puede calcularse mediante la Ecuación 3.2.

$$Dot = \frac{Vol_{sc}}{365(n_p)} \times 1000 \quad \text{Ecuación 3.2}$$

donde:

- Dot = dotación (L/hab/día)
- Vol_{sc} = volumen suministrado al sistema en un año corregido (m³)
- n_p = número de habitantes servidos de la localidad

3.1.3. CONTINUIDAD DEL SERVICIO AGUA

El valor representativo de continuidad del servicio de agua en una red de distribución de agua potable se determina mediante un promedio ponderado de las horas que se proporciona en

las diversas zonas de servicio de la localidad, mediante la Ecuación 3.3.

$$hr_{servicio} = \frac{\sum_{i=1}^{n_z} \%_{z,i} hr_{servicio,i}}{24} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

donde:

- $hr_{servicio}$ = horas promedio de continuidad del servicio de agua de un sistema de agua potable
- $\%_{z,i}$ = porcentaje de cobertura de red o tomas domiciliarias de una zona de servicio de la red
- $hr_{servicio,i}$ = horas de continuidad del servicio de agua potable de una zona de servicio de la red
- i = zona de servicio
- n_z = número total de zonas de servicio de agua potable en una red

3.1.4. DÉFICIT ENTRE EL CAUDAL DE AGUA DISPONIBLE EN LA RED Y EL CAUDAL DE AGUA REQUERIDO POR LOS USUARIOS

Por diversas razones, así como la ubicación de las captaciones del sistema de abastecimiento, la capacidad hidráulica de la infraestructura de conducción, distribución y regularización, la topografía de la localidad, el crecimiento de la mancha urbana, etc., son la disponibilidad del agua potable ofertada por el sistema hidráulico es diferente al agua requerida por los usuarios. Este problema trae como consecuencia que la distribución en la red sea ineficaz, lo cual se traduce en problemas de escasez, disminución de presiones y discontinuidad en el servicio de agua a los usuarios.

El déficit entre el caudal de agua disponible en la red y el caudal de agua requerido por los usuarios, se determina mediante la Ecuación 3.4.

$$Def_{sar} = \sum_{i=1}^{n_{zs}} \%_{z,i} \left(\frac{Q_{s,i} - Q_{req,i}}{Q_{ts}} \right) \quad \text{Ecuación 3.4}$$

donde:

- Def_{sar} = déficit promedio en el caudal de agua disponible en la red y el caudal de agua requerido por los usuarios (\pm %)
- $Q_{s,i}$ = caudal de agua suministrado a la red de una zona de servicio i (L/s)
- $Q_{req,i}$ = caudal requerido por los usuarios en una zona de servicio i (L/s)
- Q_{ts} = caudal total suministrado a toda la red de distribución (L/s)
- $\%_{z,i}$ = porcentaje que representa una zona de servicio i , de la suma total de las zonas de servicio
- n_{zs} = número de zonas de servicio

El valor resultante es negativo si existe un déficit de suministro de agua en general en la red, y es positivo si en el sistema hay un superávit.

3.1.5. PRESIÓN MEDIA DEL AGUA EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN

La presión media de la red se obtiene con los registros de las mediciones de campo especificadas en la sección 1.2.1. Los datos de campo se promedian aplicando la Ecuación 3.5.

$$P_{med} = \frac{\sum_{j=1}^{m_p} P_j}{m} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

donde:

- P_{med} = presión media del agua en la red de distribución (kg/cm²)
- p_j = presión en el j-ésimo punto de medición en campo (kg/cm²)
- m_p = número de puntos de medición de presión
- m = número de registros de presión realizados

3.1.6. ELABORACIÓN DEL DIAGNÓSTICO DE EFICIENCIA HIDRÁULICA

La elaboración del diagnóstico de eficiencia hidráulica de un sistema de distribución de agua potable se conforma por cinco actividades:

1. La identificación de las características de la población
2. La descripción del funcionamiento actual del sistema de agua potable
3. La actualización de los planos de la red
4. El cálculo de consumos, dotación y gastos de operación
5. El cálculo del balance volumétrico de la red actual

A continuación se detalla cada una de estas partes del diagnóstico de eficiencia hidráulica del sistema de abastecimiento.

3.1.6.1. Características de la Población

En un diagnóstico de eficiencia hidráulica es importante estimar el número de habitantes servidos por el sistema de abastecimiento de agua potable y la cobertura de la red de distribución.

El número de habitantes servidos se calcula multiplicando el índice de hacinamiento de la localidad, por el número de tomas domésticas conectadas a la red de distribución de agua. La cobertura del servicio se obtiene dividiendo el número de habitantes servidos, entre el número de habitantes totales de la localidad.

Cabe mencionar que los datos de población son muy discutidos por los técnicos, ya que en ocasiones existen discrepancias significativas entre los valores oficiales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el Consejo Nacional de Población (Conapo), la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el propio organismo operador. No obstante, es necesario analizar las inconsistencias detenidamente; por ejemplo, una vivienda deshabitada o un lote baldío con una toma domiciliaria conectada a la red son descartados por el INEGI en el conteo de habitantes, en cambio el organismo operador puede contabilizarlos si no ha confirmado que ahí no vive nadie. También, pueden cometerse errores frecuentes al considerar tomas domiciliarias domésticas, que en realidad son de uso comercial.

Lo conveniente en estos casos es realizar la vinculación de tomas domiciliarias (sección 1.2.10) y extrapolar los resultados para obtener los datos de la población servida.

3.1.6.2. Descripción del sistema y su operación

Una vez recopilada y analizada la información en el organismo operador se procede a documentar la forma en que funciona el sistema de agua potable. Para describir la operación de un

sistema de agua potable se recomienda obtener la siguiente información:

1. Origen de las extracciones de agua, fuentes y captaciones, ubicación y gastos de producción
2. Trayectoria, longitud, diámetro y tipo de material de las conducciones, estructuras accesorias, capacidad hidráulica, protecciones antiarriete y válvulas de aire y desfogues existentes
3. Ubicación de tanques de regulación y rebombes, capacidad, dimensiones y tipo de material con el que están construidos
4. Configuración de la red de distribución con diámetros de tubería, longitudes, tipo de material, válvulas y ubicación de elementos que la conforman
5. Proceso de operación actual del sistema de agua potable, zonas de servicio e influencia, movimientos de válvulas, encendido y apagado de pozos y rebombes, horarios de operación y atención de situaciones de emergencia
6. Investigación de obras en proceso de construcción a corto plazo
7. Situación del sistema de macromedición
8. Condiciones del programa de control de fugas, estadísticas, equipos y métodos
9. Características del sistema de micromedición

Es recomendable acompañar la descripción del sistema de agua potable con fotografías de cada estructura, croquis de localización de captaciones y obras del sistema, diagramas de conducciones indicando caudales y dirección del flujo de agua, croquis de los detalles de fontanería de los pozos, cárcamos, rebombes y tanques; tablas con valores de capacidad de tanques, pozos y cárcamos de rebombeo y datos de placa

de los equipos de bombeo, gráficas porcentuales de ocurrencia de fugas, coberturas de macro y micromedición, clasificación de tomas domiciliarias, planos de áreas y horarios de servicio, áreas de influencia de tanques y rebombes, y de distribución de presiones en la red.

En ocasiones, el organismo operador cuenta con proyectos para ampliar o rehabilitar la red de agua potable a corto plazo, por lo que es importante describirlos en el diagnóstico de eficiencia física para integrarlos en el proyecto de eficiencia hidráulica.

Finalmente, es de suma importancia incluir los planes de crecimiento que tenga considerado el organismo operador, ya que de esta manera podrán ser tomados en cuenta.

3.1.6.3. Actualización de los planos de la red

El catastro de la red tiene por objeto dejar evidencia gráfica del estado físico que guarda la red de abastecimiento y de la operación hidráulica, con información actualizada, confiable y organizada de manera adecuada.

El catastro de la red se conforma por una serie de planos y fichas técnicas, que sirven para ubicar los elementos de la red, así como para referir el estado y características físicas: la topología de la red, el tipo de material, el diámetro de tubería, simbologías, ubicación de obras de captación, válvulas, tanques, rebombes, potabilizadoras, etc.

Lo ideal es que los planos y fichas técnicas del catastro se encuentren actualizadas y tengan datos confiables, pero no siempre ocurre esto, por lo que es necesario analizar si la informa-

ción servirá para los fines que se persiguen en un proyecto de eficiencia hidráulica. Es necesario entonces, verificar que los planos de red tengan las siguientes características:

1. Es preferible que el plano se encuentre digitalizado con algún software de dibujo; cuando solo se disponga de una versión impresa de los planos, deberán digitalizarse
2. La traza de las calles y colonias de la localidad donde se dibuja la red de tubería deben estar actualizadas. El INEGI dispone de planos catastrales de las localidades del país que pueden adquirirse a bajo costo
3. El plano debe estar georeferenciado y escalado; es decir, sus coordenadas deben estar referenciadas a las coordenadas geográficas universales reales de la localidad
4. Si el plano está en versión digital, deberá estar depurado en cuanto a los *layers* o capas, dejando únicamente aquellas que son necesarias y con los elementos que comparten características similares
5. En el caso de que existan proyectos de nuevos desarrollos o ampliaciones de la red de agua potable, resulta importante que el organismo operador proporcione los planos correspondientes con la finalidad de incorporarlos al plano de la red
6. En cuanto a los planos de las líneas de conducción que parten desde las fuentes de abastecimiento, se requieren los perfiles topográficos a lo largo de su trazo, señalando las estaciones a cada 0.50 a 2.00 metros con sus elevaciones

7. Las válvulas de seccionamiento y de control automático se deben ubicar en los planos, señalando si se encuentran abiertas, cerradas o parcialmente abiertas, y anotando sus valores de calibración
8. Se debe utilizar una capa o *layer* para dibujar las zonas de influencia de tanques, áreas y horarios de servicio
9. Es necesario dibujar los cruceros y detalles de piezas especiales en planos de detalle
10. Se deben elaborar fichas técnicas de la fontanería a detalle de tanques y rebombes

Es importante que la red de abastecimiento tenga simbologías y una capa o *layer* para cada elemento hidráulico que permita su identificación dentro del plano. En la Ilustración 3.1 se muestra un ejemplo del trazo de la red; los círculos rellenos representan válvulas de seccionamiento abiertas y cerradas, la tubería de distribución se presentan de color azul y las de conducción de rojo, los arcos en la tubería indican que no existe interconexión entre ellas y las flechas indican el sentido del flujo en la tubería de llegada y salida de tanques.

El plano de la red de agua potable debe contener e indicar el alcance de las zonas de influencia de las captaciones de abastecimiento, sea un pozo o tanque o rebombeo, como se muestra en la Ilustración 3.2.

Los organismos operadores que tengan un servicio intermitente o tandeado deben plasmar en el plano su programa de horarios de servicio así

Ilustración 3.1 Ejemplo de trazo de una red de abastecimiento

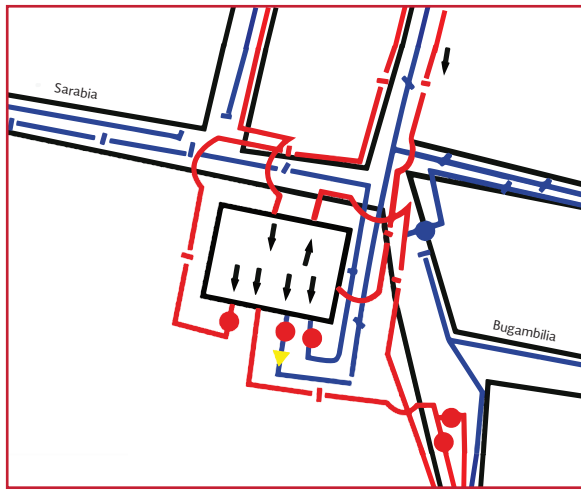


Ilustración 3.2 Ejemplo de zonas de influencia de fuentes de abastecimiento

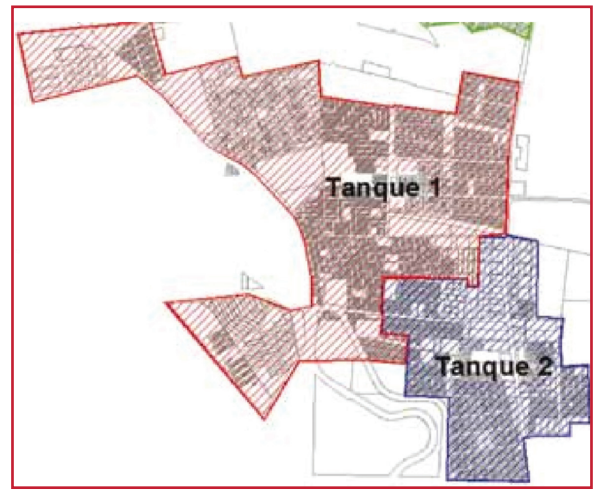
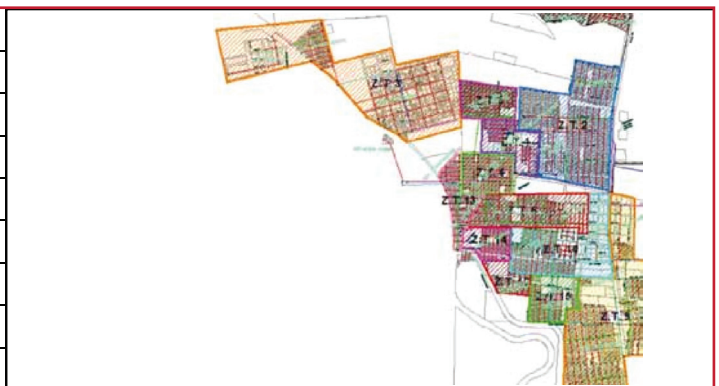


Ilustración 3.3 Ejemplo de zonas y horarios de servicio de agua

Horario suministro de agua potable	
Zona 1	Horario (horas)
1	24
2	24
3	24
4	09:00 a 13:00
5	11:00 a 19:00
6	13:00 a 19:00
7	19:00 a 7:00



como un esquema de las zonas de tandeo, ver Ilustración 3.3.

La información de la infraestructura hidráulica de la red contenida en los planos: tanques, rebombeos, pozos, plantas potabilizadoras, etc., requiere el detalle del despiece de la fontanería y de las interconexiones de la tubería. En la Ilustración 3.4 se muestra una ficha técnica del levantamiento de un tanque.

En las redes de abastecimiento es importante conocer el despiece a detalle de los cruceros de las piezas especiales, así como el estado en que se encuentran las válvulas ya que estos elemen-

tos son muy importantes en un sistema para el control del flujo. En la sección 1.2.8 del presente libro se indica el procedimiento para realizar esta actividad.

El procedimiento para llevar a cabo la actualización de los planos de un sistema de agua potable es el siguiente:

1. Se realiza una revisión de los planos de los que disponga el organismo operador con el fin de ubicar la tubería que no se encuentra digitalizada y se actualizan con las modificaciones que ha tenido la red de agua potable hasta la fecha

Ilustración 3.4 Ejemplo de un levantamiento de fontanería de tanques

Fecha		Ubicación y referencias	Colonia	ID. Tanque
21	Ago. 2013	Villa de las Flores s/n.	Hornos Cuates	SUP-HC


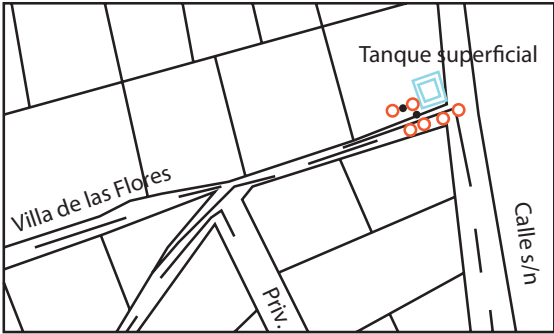


Imagen de tanque

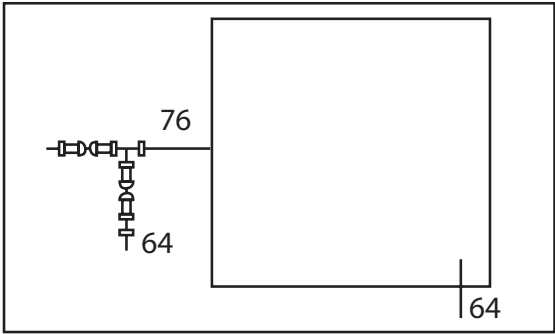
Características del tanque	
Horas de operación	6
Días de la semana	4
Capacidad	
Volumen	44 m ³
Dimensión X	5.82 m
Dimensión Y	4.79 m
Elevación máxima	2 m
Cota de fondo	980 msnm

Características de la línea de llegada	
Diámetro de la tubería	2"
Tipo de material	Acero inox.

Características de la línea de salida	
Diámetro de la tubería	4"
Tipo de material	Acero inox.



Croquis de ubicación



Despiece de piezas especiales

2. Se confrontan los planos existentes con las imágenes satelitales para confirmar su nivel de georeferenciación
3. Asimismo, se analizan los detalles de la traza catastral de la ciudad para comprobar que se encuentra actualizada y georeferenciada. En caso de que no sea adecuada, se procederá a redibujar toda la red en una cartografía reciente
4. Se realizan entrevistas con el personal de operación y mantenimiento y se hacen recorridos de campo específicos para verificar detalles físicos y actualizarlos en los planos
5. Se hace una depuración de las capas o *layers* para optimizar el manejo del plano digital
6. Finalmente, con el apoyo de los resultados de la inspección física de cajas de válvulas se interpretan los trazos dudosos de la red de distribución y se afinan detalles en los cruces

Los planos actualizados del catastro de la red de agua potable se presentan dibujados a escala 1:2 000. Se incluye el croquis de localización que indica la localidad con todas sus vías de comunicación, así como su orientación y coordenadas geográficas.

La red se dibuja de acuerdo con la simbología normalizada. En los cruceros se anota la cota topográfica y en la tubería se apunta el valor del diámetro y longitud. También, se indican la ubicación de las válvulas de control, los datos técnicos actuales y la simbología respectiva. Se elabora otro plano con el detalle de los cruceros de la red y de la fontanería de tanques y trenes de descarga de pozos. El tamaño de los planos normalmente es de 90 por 60 centímetros.

Cuando un solo plano no sea suficiente para contener la totalidad de la red actual, debe elaborarse el número de planos para impresión que sea necesario, indicando en forma esquemática un mosaico que muestre achurado el plano del que se trata.

Los planos se tendrán que elaborar en formato digital y deberán cumplir con el formato y configuración establecida por el organismo operador respectivo.

3.1.6.4. Cálculo de consumos, dotación y gastos de operación

En un diagnóstico de eficiencia hidráulica de un sistema de agua potable, es necesario calcular los consumos, dotación, gastos de operación y diseño, con la finalidad de conocer la disponibilidad hidráulica de las obras de captación y los

requerimientos de los usuarios del sistema de abastecimiento de agua potable.

Tenemos que conocer los valores para las condiciones actuales y estimar las condiciones requeridas. Los consumos unitarios y las dotaciones se obtienen con los procedimientos indicados en las secciones 3.1.1 y 3.1.2 del presente libro, respectivamente.

El gasto de operación medio anual en condiciones actuales se determina sumando todos los caudales medios producidos en las captaciones del sistema de agua potable.

Cuando el clima de la localidad que se está estudiando tiene variaciones extremas en verano e invierno, es importante determinar el gasto medio de operación para cada temporada. La división del gasto mayor entre el menor, es igual al coeficiente de variación máximo diario del sistema.

Para estimar el déficit o el superávit en la producción del agua para el sistema de abastecimiento, el resultado del gasto medio disponible debe ser comparado con el caudal medio requerido por los usuarios. Este dato es muy importante para elaborar el proyecto de eficiencia hidráulica, puesto que de ello se derivarán las estrategias para mejorar el sistema de distribución de agua potable.

El caudal medio requerido por los usuarios se determina fijando la dotación que debería existir en el sistema de abastecimiento en condiciones de plena satisfacción de los usuarios y aplicando la Ecuación 3.6.

$$Q_{medreq} = \frac{Dot_{req} n_{serv}}{86\ 400} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

donde:

- Q_{medreq} = gasto medio requerido actual (L/s)
 Dot_{req} = dotación actual requerida para satisfacer adecuadamente a los usuarios [L/(hab día)]
 n_{serv} = número de habitantes servidos en el sistema de agua potable

La dotación actual requerida Dot_{req} se determina considerando el nivel de fugas actual obtenido en el diagnóstico de eficiencia física (sección 2.1 del libro) y aplicando la Ecuación 3.7.

$$Dot_{req} = \frac{Cu_d(Cu_{nd})}{1 - \frac{\%fugas}{100}} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

donde:

- Cu_d = consumo unitario doméstico requerido para satisfacer adecuadamente a los usuarios [L/(hab día)]
 Cu_{nd} = consumo unitario no doméstico, calculado con la Ecuación 3.8 ([L/(hab día)]
 $\%fugas$ = fugas potenciales en el sistema de distribución (%)

$$Cu_{nd} = \frac{(C_{NodomésticoMedido} + C_{Nodomésticocuotafija} + C_{Nodomésticomalmedido} + C_{Nodomésticoadicionales})}{n_{servida}}$$

Ecuación 3.8

El consumo unitario doméstico requerido para satisfacer adecuadamente a los usuarios, se obtiene de los datos de la Tabla 3.1.

3.1.6.5. Cálculo del balance volumétrico de la red actual

El balance volumétrico es una herramienta que presenta las características de demanda, suministro y tipo de distribución de un sistema de agua potable en un esquema numérico sencillo y que facilita su visualización.

El principal objetivo de este balance volumétrico es evaluar el desequilibrio entre el gasto disponible y el consumo demandado por la población que existe en zonas de servicio bien delimitadas, tomando en cuenta características específicas de cada una como dotación, presencia de grandes consumidores, tipo de distribución, entre otras.

El balance volumétrico se desarrolla en cuatro pasos:

1. Se delimitan zonas de servicio en la red
2. Se define el gasto disponible en cada zona y su tipo de funcionamiento
3. Se calcula el número de usuarios domésticos dentro de cada zona
4. Se determina el desequilibrio correspondiente

Paso 1 Delimitación de zonas de servicio actuales

El número total de zonas de servicio se define considerando las características de operación actual del sistema de agua potable y el criterio del analista. Para disminuir el efecto criterio-tendencia del analista, se recomienda seguir los siguientes lineamientos:

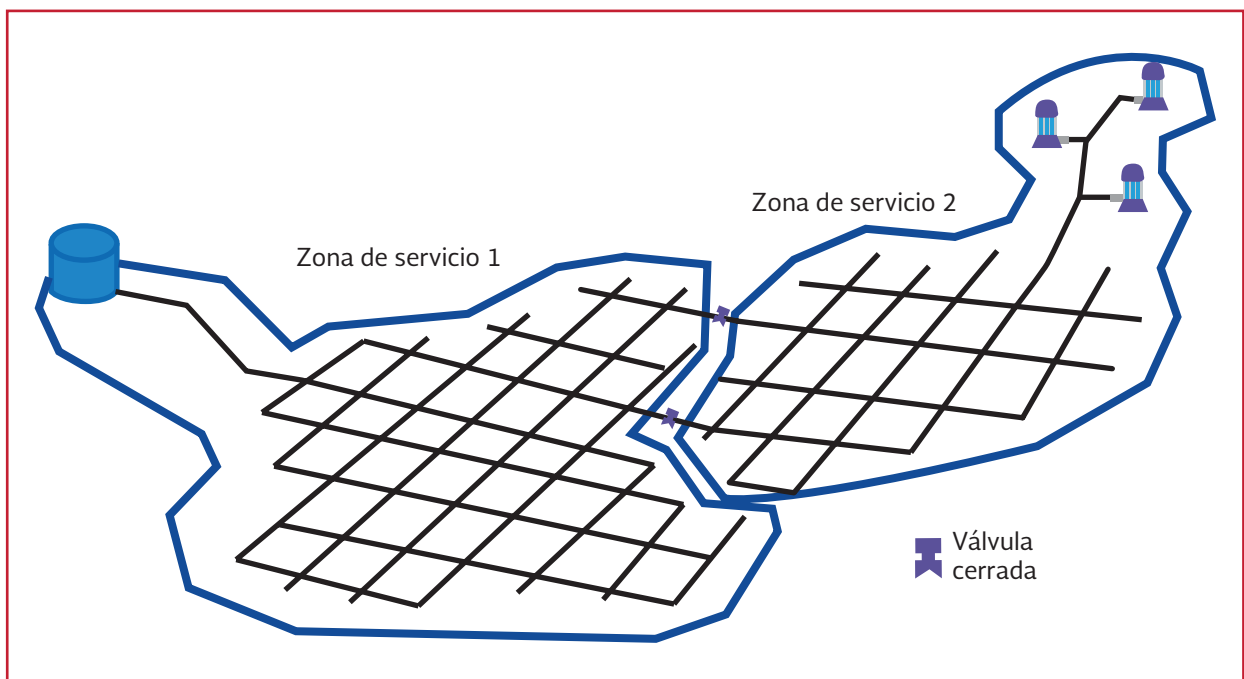
- a) Procurar que cada zona de servicio corresponda sólo a un tanque de regulación, rebombeo, pozo o grupo de pozos con una conducción común. Un mayor número de zonas de servicio ofrece la posibilidad de considerar con mayor detalle las diferentes características de operación y demanda de cada una de ellas (Ilustración 3.5)
- b) Cuando existen dos o más puntos de conexión entre dos posibles zonas de servicio y los mismos operan generalmente abiertos, se deben considerar ambas como una sola zona
- c) Es conveniente evitar la definición de zonas de servicio compuestas, ya que el análisis de su comportamiento para efectos del balance volumétrico se vuelve complicado. En la operación diaria de un sistema también es compleja la predicción del funcionamiento de una zona con estas características

Paso 2 Análisis de la disponibilidad de agua en las zonas de servicio actuales

La disponibilidad de agua en cada una de las zonas de servicio se define de acuerdo con el tipo de captaciones de suministro de la siguiente manera:

- a) Zona de servicio con pozo inyectando directamente a la red. El gasto disponible corresponde al gasto de diseño del pozo. Para las zonas alimentadas con dos o más pozos inyectando directamente a la red, el gasto disponible se definirá como la suma de los gastos de diseño de los pozos. Se recomienda la verificación del gasto que produce el pozo en campo. El gasto disponible será el máximo que resulte durante la operación del pozo con las válvulas de su tren de descarga abiertas completamente

Ilustración 3.5 Ejemplo de definición de zonas de servicio de agua



- b) Zona de servicio a partir de un tanque de regulación. El gasto disponible para este tipo de zona corresponde al gasto medio que ingresa al tanque de regulación. Para estimar su valor, en caso de no contar con un macromedidor en la tubería de ingreso al tanque, se realizarán mediciones durante 24 horas y se calculará un gasto medio de ingreso, de acuerdo con los procedimientos de la sección 1.2.3 del libro. Cuando el tanque es alimentado directamente desde un pozo o zona de pozos, sin entrega de agua en ruta de la conducción, el gasto disponible en la zona corresponderá a la suma de los gastos de extracción en los pozos
- c) Zona de servicio a partir de un rebombero alimentado con un tanque de regulación. El gasto disponible se definirá de la misma manera que en las zonas con tanque de regulación, pero deberá además verificarse que la capacidad máxima del sistema de rebombero pueda cubrir por lo menos el gasto máximo horario calculado a partir del gasto medio de ingreso al tanque
- d) Zona de servicio a partir de un rebombero en línea tipo booster. Para considerar como válida una zona de servicio de este tipo es primordial asegurar que siempre se tenga el mismo gasto disponible a la entrada del rebombero, lo cual en general no se cumple ya que estos equipos se encuentran casi siempre conectados a alguna tubería de una red de distribución de otra zona de servicio. En este caso, se recomienda que la zona abastecida por el rebombero se considere como parte de la zona de servicio anterior al mismo. Cuando este tipo de rebombero se encuentra como derivación de una línea de conducción principal, el gasto disponible se definirá como el máximo que resulte de su operación con las válvulas en su tren de descarga completamente abiertas
- e) Zonas de servicio compuestas. Como se comentó anteriormente, el funcionamiento de estas zonas es complicado, por lo que para su análisis se considera que toda la zona de servicio es alimentada a partir de un tanque de regulación. Esta simplificación implica que el gasto disponible será la suma de los siguientes gastos: el gasto medio diario real de ingreso al tanque, obtenido de la misma manera que para las zonas de servicio de este tipo y 65 por ciento del gasto máxi-

Tabla 3.3 Ejemplo de formato de disponibilidad de agua por zona de servicio actual

Zona de servicio	Captación	Gasto disponible (L/s)	Gasto disponible total (L/s)	Tipo de distribución
Zona 1	Pozo 1	10	10	Directa
Zona 2	Pozo 2	15	37	Directa
	Pozo 3	22		
Zona 3	Pozo 4	10	10	Regulada
	Tanque 1			
Zona 4	Pozo 4	12	25	Regulada
	Tanque 2			
	Pozo 5 (20 L/s) (65 %)			
Sumas		82	82	

mo de operación del pozo o pozos que se encuentren inyectando directamente a la red

Se recomienda que toda la información generada sobre gastos disponibles se anote en un formato como el de la Tabla 3.3.

Paso 3 Distribución espacial de los usuarios

Con base en el padrón de usuarios se define el número de usuarios domésticos conectados a la red dentro de cada una de las zonas de servicio propuestas. Cuando en la información entregada por el departamento comercial, el padrón de usuarios no se encuentra relacionado directamente con las zonas de servicio se pueden utilizar métodos alternativos considerando los detalles de cada usuario con que cuente el padrón, por ejemplo su colonia o ruta de cobro, cuando la segunda se encuentra bien delimitada en espacio.

Cuando una misma colonia o ruta de cobro pertenezca a dos o más zonas de servicio, deberá estimarse el número de usuarios que corresponde a cada una de ellas, de acuerdo con el mejor criterio disponible. El más sencillo es el porcentaje de área correspondiente. En este análisis se

puede considerar la ubicación de grandes consumidores industriales dentro de su zona de servicio correspondiente.

La información obtenida de este análisis se colocará en un registro como el de la Tabla 3.4.

Paso 4 Cálculo del balance volumétrico actual

El balance volumétrico se evalúa en las condiciones más desfavorables de la operación normal, las cuales se presentan durante los días más calurosos del año en las horas de máxima demanda. Para calcular estas condiciones se tomará en cuenta la dotación, índice de hacinamiento y coeficientes de variación, calculados como se indica en las secciones 3.1.6.1, 3.1.6.2, 3.1.6.3 y 3.1.6.4, respectivamente.

El balance volumétrico se presentará de manera similar a como se muestra en la Tabla 3.5, en la que se resumen los análisis de disponibilidad de agua y distribución espacial de usuarios; se calcula el gasto requerido de acuerdo con su tipo de distribución y se evalúa el desequilibrio de cada zona de servicio. Para el ejemplo presentado en la Tabla 3.5, se utiliza una dotación supuesta de 375 L/hab/día y un índice de hacinamiento de 4.5.

Tabla 3.4 Ejemplo de formato de distribución espacial de usuarios

Zona de servicio	Colonia	Usuarios domésticos
Zona 1	A	350
	B	140
	C	210
Zona 2	D	320
	E	170
Zona 3	F	540
Zona 4	G	335
	Gran consumidor 1	1
Sumas		2 066

En el cálculo del balance volumétrico, el gasto requerido depende del tipo de distribución, de tal manera que para zonas de servicio con inyección directamente a la red se calcula de acuerdo con la Ecuación 3.9, y para zonas reguladas se calcula con la Ecuación 3.10.

$$Q_{req_{directa}} = Q_{med} CVMD(CVMH) \quad \text{Ecuación 3.9}$$

$$Q_{req_{regulada}} = Q_{med} CVMD \quad \text{Ecuación 3.10}$$

donde:

Q_{med} = gasto medido (L/s)

Q_{req} = gasto requerido (directo o regulado) (L/s)

CVMD = coeficiente de variación máxima diaria

CVMH = coeficiente de variación máxima horaria

La diferencia se calculará en cada zona restando al gasto disponible el gasto requerido, cuyo valor es el déficit o superávit en la zona en cuestión.

3.2. PROYECTO DE EFICIENCIA HIDRÁULICA

El proyecto de eficiencia hidráulica tiene como objetivo realizar una redistribución de presiones y caudales en la red de distribución de un sistema de abastecimiento de agua potable, para optimizar su funcionamiento y ahorrar agua, facilitar las labores de mantenimiento y control de fugas, aprovechar las oportunidades de ahorro de energía y ampliar la cobertura del servicio.

La característica principal de un proyecto de eficiencia hidráulica, a diferencia de un proyecto

Tabla 3.5 Ejemplo de formato de balance volumétrico

Zona de servicio	Colonia	Usuarios	Población (habitantes)	Gasto medio (L/s)	Gasto medio (L/s)
Zona 1	A	350	1 575	6.84	9.57
	B	140	630	2.73	
	C	210	945	4.1	
Zona 2	D	320	1 440	6.25	13.67
	E	170	765	3.32	
Zona 3	F	540	2 430	10.55	16.55
	G	335	1 508	6.55	
Zona 4	Gran consumidor 1	1	0	10	10
Sumas		2066	9293	50.33	50.33
Zona de servicio	Fuentes	Gasto disponible (L/s)	Distribución	Gasto requerido (L/s)	Diferencia (L/s)
Zona 1	Pozo 1	10	Directa	20.77	-10.77
Zona 2	Pozo 2	37	Directa	29.67	7.33
	Pozo 3				
Zona 3	Pozo 4 - Tanque 1	10	Regulada	14.77	-4.77
Zona 4	Pozo 4 - Tanque 2	25	Regulada	23.16	1.84
	Pozo 5				
Sumas		82		88.36	-6.36

tradicional hidráulico, es la de lograr este objetivo utilizando los mismos recursos que se aplican actualmente.

El diseño de la red en sectores es un esquema que permite alcanzar este objetivo con cierta rentabilidad y relativa rapidez, pero esta sectorización deberá estar conformada con base en un análisis hidráulico de alto nivel, aplicando simuladores hidráulicos de redes de agua potable, utilizando tecnología de punta sobre sistemas de control automático y medición.

Actualmente, en México se maneja indistintamente la sectorización de redes y los distritos hidrométricos; sin embargo, no son lo mismo. De hecho, un sector puede contener varios distritos hidrométricos dentro de su área.

Los distritos hidrométricos son elementos que se aíslan hidráulicamente con movimientos de válvulas en forma temporal, para realizar pruebas de consumos, detectar fugas y evaluar eficiencia física. Su diseño se basa en especificaciones concretas, para que las pruebas en campo resulten confiables, por ejemplo, se maneja un número de usuarios, con la idea de que en la medición de los caudales registrados en la entrada del distrito no se tengan errores significativos; o bien, el distrito puede tener una o varias entradas o salidas y puede estar abasteciendo a otros distritos, puesto que no se altera de ningún modo la prueba en turno.

En cambio, la sectorización de redes de agua potable tiene otra connotación en su diseño, ya que se trata de formar elementos separados físicamente unos de otros, interconectados hidráulicamente solo mediante líneas de conducción o circuitos primarios de la red que entreguen el agua en bloque. Así, el diseño de cada sector

obedece más a la topografía de la ciudad, a la ubicación y capacidad hidráulica de las captaciones, rebombes, tanques, conducciones y tubería; a los valores de demanda de agua de los usuarios y no a simples especificaciones de dibujo. Los sectores deben analizarse y diseñarse hidráulicamente en forma integrada, considerando el mínimo de cortes, conexiones, movimientos de válvulas e instalaciones de tubería. Los sectores tienen forma irregular y el número de usuarios dentro de él depende de la disponibilidad del agua y de la infraestructura existente.

El proyecto de eficiencia se desarrolla en forma similar al proyecto de un sistema de agua potable tradicional. Igualmente, hay que definir la dotación y gastos de diseño (secciones 3.1.1 a 3.1.5 del libro), hacer una proyección de la demanda de agua en el tiempo, y considerar las zonas de crecimiento de la mancha urbana.

En los proyectos de sectorización y eficiencia hidráulica hay que tener en cuenta que varios de los parámetros de diseño tradicionales cambian o se simplifican o no aplican. Por ejemplo, el periodo de diseño es corto, del orden de uno o dos años, debido a que pierde sentido la proyección a mediano plazo, por tratarse precisamente de elevar la eficiencia del sistema de manera rápida. Otra situación es que en el proyecto tradicional se promueve casi siempre la construcción de nueva infraestructura; en cambio, en el proyecto de eficiencia se busca aprovechar al máximo la infraestructura existente.

Para la elaboración del proyecto de eficiencia hidráulica es necesario primero realizar un diagnóstico con los procedimientos señalados en la sección 3.1.6 de este libro. Con ello, se define la población del proyecto, el funcionamiento del sistema de abastecimiento actual, se actualizan

los planos de la red y se determina el desequilibrio espacial entre el agua suministrada y la demandada por los usuarios por cada zona de la ciudad.

Después de obtener el diagnóstico, se realizan los siguientes procesos para elaborar e implementar el proyecto de eficiencia hidráulica de un sistema de agua potable:

1. Conformación de los nuevos sectores para redistribuir los caudales y presiones
2. Elaboración del modelo de simulación hidráulica de la red
3. Análisis y diseño hidráulico de la red sectorizada
4. Análisis y diseño hidráulico de conducciones para entrega de agua en bloque
5. Puesta en marcha del proyecto de sectorización

Se recomienda que estos procesos se ejecuten en la secuencia en que fueron descritos para lograr mejores resultados en el proyecto.

También, es recomendable aplicar las técnicas y criterios descritos en el documento sobre sectorización publicado por la Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento de la CONAGUA.

3.2.1. CONFORMACIÓN DE SECTORES PARA REDISTRIBUCIÓN DE CAUDALES Y PRESIONES EN LA RED

La palabra sectorización no es reconocida por la Real Academia de la Lengua Española y no existe

en el diccionario; la palabra sector está definida como: una parte de una ciudad, o como subdivisión de una red. Dentro del subsector de agua potable, el término sectorización es conocido como la formación de zonas de suministro autónomas, mas no independientes, dentro de una red de distribución; en palabras simples, es la partición de la red en muchas pequeñas redes, con el fin de facilitar su operación. De este modo, será mucho más sencillo controlar los caudales de entrada en cada sector, las presiones internas de la tubería, la demanda y el consumo, así como las pérdidas de agua, tanto en fugas como en usos no autorizados. Aún más, puede conducirse el agua por la red primaria, sin exceso de conexiones con la secundaria, desde la fuente de alimentación hasta los puntos más lejanos, generalmente sacrificados en la distribución del agua.

Un sector es una porción de la red de distribución bien delimitada geográficamente, la cual cuenta con una fuente de abastecimiento definida y con capacidad suficiente para cubrir la demanda de los usuarios y sus variaciones en el tiempo. A continuación se presentan las etapas para definir la conformación de sectores.

Distrito hidrométrico = sector hidrométrico = sector

Debe estar perfectamente delimitada por medio de válvulas de seccionamiento, adecuadamente instrumentada para aforar el caudal de entrada, para medir y controlar la presión de operación, a fin de brindar la misma calidad del servicio de suministro a la totalidad de los usuarios contenidos en esta red.

Ante tales ventajas, cualquier organismo operador desearía llevar a cabo la sectorización; no obstante, se requiere una serie de condiciones que permitan realizarla con cierto nivel de confiabilidad y obtener los resultados esperados.

Contar con la información completa del sistema de distribución (catastro) y la forma de operación real para poder utilizar un software o modelo numérico que permita simular el funcionamiento hidráulico del sistema, el mismo que deberá verificarse mediante algunas mediciones estratégicas y realizar así una calibración del modelo.

Son comunes los casos en que los operadores creen conocer su *red* a la perfección. Las decisiones de abrir y cerrar válvulas hacen que la distribución en la localidad sea ineficaz. La calibración de un modelo numérico permite contar con una red virtual idéntica a la real, en cuyos tubos podemos medir gastos y presiones que indiquen el comportamiento real del sistema. Cualquier cambio que se haga en el modelo permitirá conocer los efectos que produce, tomando entonces las decisiones pertinentes con la seguridad de que el funcionamiento real será el mismo que el obtenido a través de la computadora.

Al contar con un modelo confiable, debidamente calibrado, se podrá *jugar* con varias formas de operación y sobre todo, la red puede dividirse en varios sectores mediante la conformación de los llamados *distritos hidrométricos*, que no es más que el establecimiento de sectores a fin de controlar y mantener presiones adecuadas y realizar la auditoria del agua por zonas; es decir, conocer lo que sucede con el agua.

3.2.1.1. Factibilidad técnica y económica

La necesidad de llevar a cabo la sectorización de la red de distribución se hace mayor mientras esta sea más grande, por consecuencia su

operación se vuelve más compleja. Destacan dos características principales de las grandes redes:

- Funcionan con diversos niveles de presión a lo largo de la red y en el transcurso del día
- Están formadas por una exagerada cantidad de circuitos cerrados, lo que en el medio se conoce como 'fuertemente mallada'

De este modo, se hace necesaria una evaluación de la conveniencia de llevar a cabo la sectorización, pues al menos debe garantizarse que el servicio se mantenga en el mismo nivel de calidad. Aunque parezca absurdo lo mencionado anteriormente, no es muy remota la idea de provocar cambios bruscos en la operación de la red en perjuicio de los usuarios, pues el proceso es lento y los resultados no son inmediatos. Por ello, cobra importancia la confiabilidad de la información y la actualidad del catastro, así como la simulación del funcionamiento del sistema con un modelo calibrado.

Por otra parte, resulta indispensable el análisis de factibilidad económica a corto y mediano plazo, donde se evalúe la rentabilidad de los diversos esquemas de sectorización planteados.

Los costos asociados a estas acciones, adicionales a los relacionados con la actualización del catastro y la modelación de un simulador hidráulico, incluyen la instalación de válvulas de seccionamiento y de control de la presión; y los cortes requeridos para independizar circuitos, así como la obra civil derivada de la instalación de nuevas líneas de interconexión, rehabilitación de tubería existente, nuevos tanques de almacenamiento, etcétera.

3.2.1.2. Etapas de la sectorización

El proceso de esta acción es largo y requiere gran cantidad de recursos humanos y económicos, por lo que debe partir de una planeación precisa y sobre todo comprometida por parte de los responsables de la prestación del servicio de agua potable de la localidad, más aun si se considera que los resultados no se obtienen en el corto plazo y tampoco ofrece las bondades que representan las obras visibles que ganan popularidad entre la comunidad. Por ello, cobra gran importancia mantener informada a la ciudadanía sobre la necesidad de llevar a cabo estas acciones.

No está de más el acercamiento a los organismos que de alguna manera ya han vivido la experiencia de este proceso con éxito, por lo que en el siguiente apartado se abordarán algunos casos destacados en la materia y cuyos resultados han dejado suficiente evidencia de su progreso.

Resumen las etapas que deben seguirse durante la sectorización:

1. Catastro del sistema de distribución de agua potable
2. Anteproyecto del sistema, puntos de alimentación definidos y posibles interconexiones controladas para protección de eventualidades
3. Diseño e implementación de un sector piloto, incluyendo las válvulas de seccionamiento necesarias, los mecanismos para el control de las presiones, la medición de gastos de alimentación, así como la variación diaria de la demanda, ya sea que esta sea supuesta o inferida por algunas mediciones

4. Calibración de un modelo de simulación hidráulica con base a las mediciones del punto anterior (ver sección 3.2.2)
5. Ajuste del proyecto piloto a partir de la modelación, controlando las presiones, midiendo los gastos y evaluando la relación entre presión y fugas (ver sección 3.2.2)
6. Ampliación de la experiencia piloto a dos o tres sectores más
7. Con los resultados obtenidos, puede evaluarse el proyecto integral de sectorización, con una muy buena aproximación sobre los costos y los beneficios que pueden esperarse, así como los tiempos necesarios

3.2.1.3. Definición de sectores y puntos de alimentación

El sector está definido como una red de distribución más pequeña, perfectamente limitada y homogénea en su operación, de tal forma que facilite el control de su funcionamiento. Los criterios a seguir para llevar a cabo la división en sectores, parten de la infraestructura existente y de las diferentes zonas de presión en operación normal antes de haber iniciado el proceso, lo que significa una primera propuesta de sectorización; las adecuaciones a esta, pueden realizarse con la ayuda de las siguientes recomendaciones generales:

- Se puede considerar de 1 a 5 sectores por cada 100 hectáreas (1 km²); en zonas con alta densidad de población, los sectores pueden ser de 10 a 15 hectáreas. Algunos expertos dimensionan los sectores en función del número de usuarios o de tomas

- Cualquiera de las recomendaciones que haya sido seleccionada para definir el tamaño de los sectores, deberá ajustarse a la geometría de la red, sobre todo a la adaptación de las condiciones de operación actuales y la facilidad de contar con un punto de suministro; siempre será prudente contar con una alimentación de respaldo, aunque esta se mantenga cerrada y solo se utilice en contingencias
- Minimizar las variaciones de presión de servicio al interior del sector, es decir, mantener una cierta uniformidad de presiones entre los 15 y 50 m (1.32 y 4.40 bar), correspondientes a la dinámica mínima y estática máxima, respectivamente
- Siempre será conveniente verificar las velocidades del agua, que podrán estar comprendidas entre 0.6 y 2.0 m/s

Si bien es cierto que no resulta tan sencillo seguir todas estas sugerencias, las dificultades encontradas siempre podrán solventarse. Algunos de los problemas más comunes se refieren a la delimitación de los sectores, la caída de la presión en algunos puntos, la presencia de altas velocidades y la elevación de la presión durante las horas de menor consumo. Generalmente, este tipo de inconvenientes se reducen al considerar dos puntos de alimentación o al incluir la instalación de dispositivos reductores de presión, aunque en varias ocasiones será necesaria la construcción de líneas de interconexión adicionales.

Actualmente, la sugerencia se basa en la separación de la red primaria y la secundaria, de modo que no decaiga la presión interna de la conducción principal. De este modo, se ha dado paso

a la construcción de redes en bloques que poco a poco van sustituyendo las redes secundarias convencionales, tal y como se observa en la Ilustración 3.6 y Ilustración 3.7.

La recomendación reiterativa, la más importante, se refiere a la alimentación del sector que deberá contar con medición del caudal; sin embargo, también es recomendable contar con un tanque que regule los consumos y suministre el agua a la red con una presión relativamente constante.

El bombeo directo a la red provoca una variación adicional en las presiones de abastecimiento derivado del arranque y paro de los equipos, ya sean controlados o por fallas de energía eléctrica, así como a la propia naturaleza de operación de una bomba, de acuerdo con la rigurosa relación entre el gasto bombeado y la presión en la descarga, tal como se muestra en la Ilustración 3.8, donde se presenta una curva característica del tipo de una bomba común.

Probado y elegido el esquema de sectorización, se procede entonces a la selección de los elementos de control, que representan los medios para operar el funcionamiento del sistema, para aislar alguna zona de la red, reducir o mantener la presión del agua, permitir el flujo entre sectores, etcétera.

Algunas recomendaciones complementarias que buscan contar con un sistema de distribución confiable, son las siguientes:

- Mantener interconexiones entre sectores y entre fuentes de suministro, con válvulas cerradas, de modo que puedan derivarse caudales en casos extraordinarios

- Verificar la capacidad de conducción de las líneas principales, considerando las situaciones de emergencia en las que deban alimentar a otros sectores. En caso de ser necesario, incrementar el diámetro de esta tubería

rización idóneo será el que mejor se adapte a las necesidades propias de cada sistema de distribución, pero ante todo, hay que evaluar el costo en la construcción de nuevas líneas de conducción y tanques de regulación, cortes, instalación de válvulas, etc. El mejor esquema será el que ofrezca un adecuado y confiable funcionamiento hidráulico al menor costo posible.

Finalmente, la selección del esquema de secto-

Ilustración 3.6 Ejemplo de un sector con un punto de alimentación y red secundaria convencional

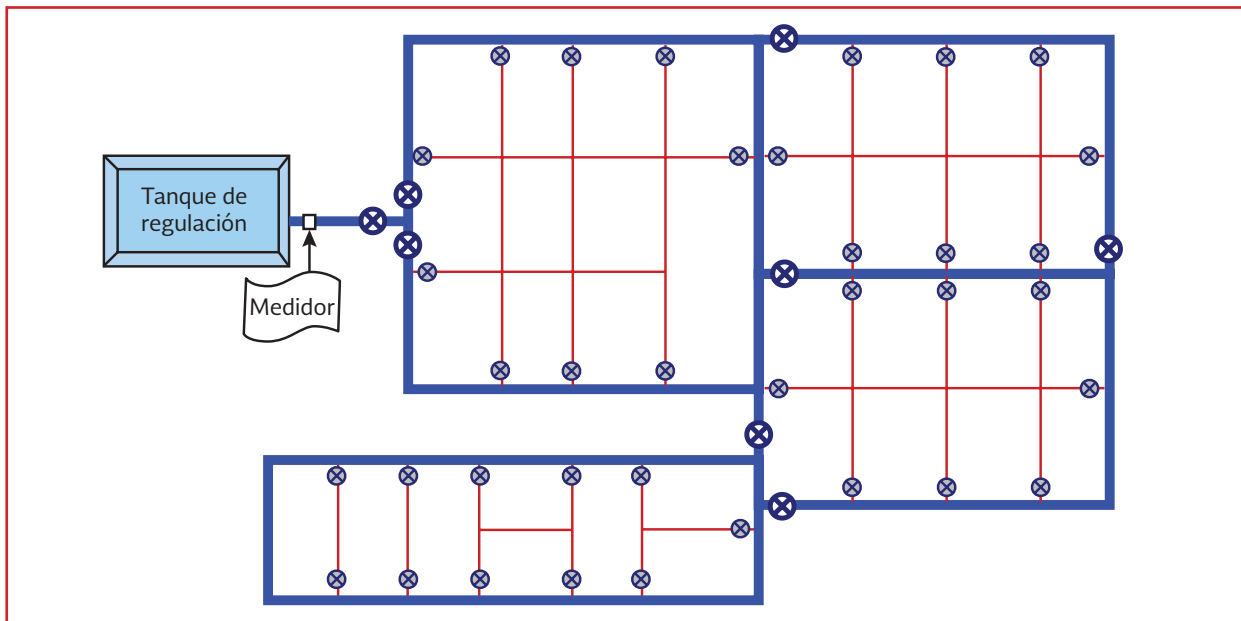


Ilustración 3.7 Ejemplo de un sector con un punto de alimentación y red secundaria en subsectores o bloques

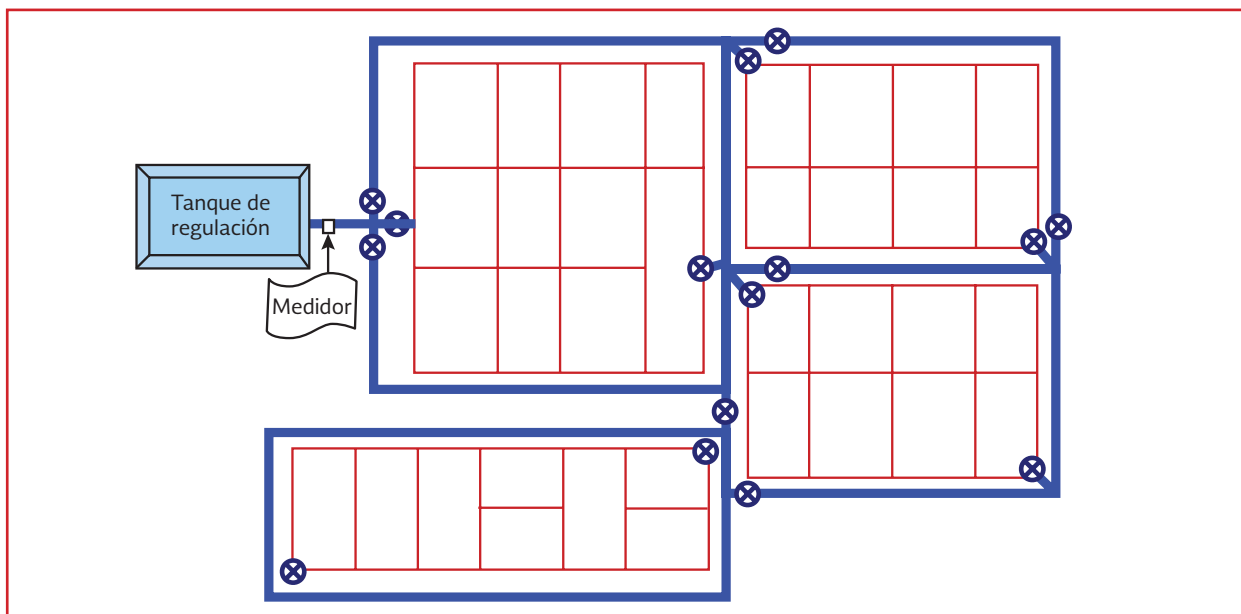
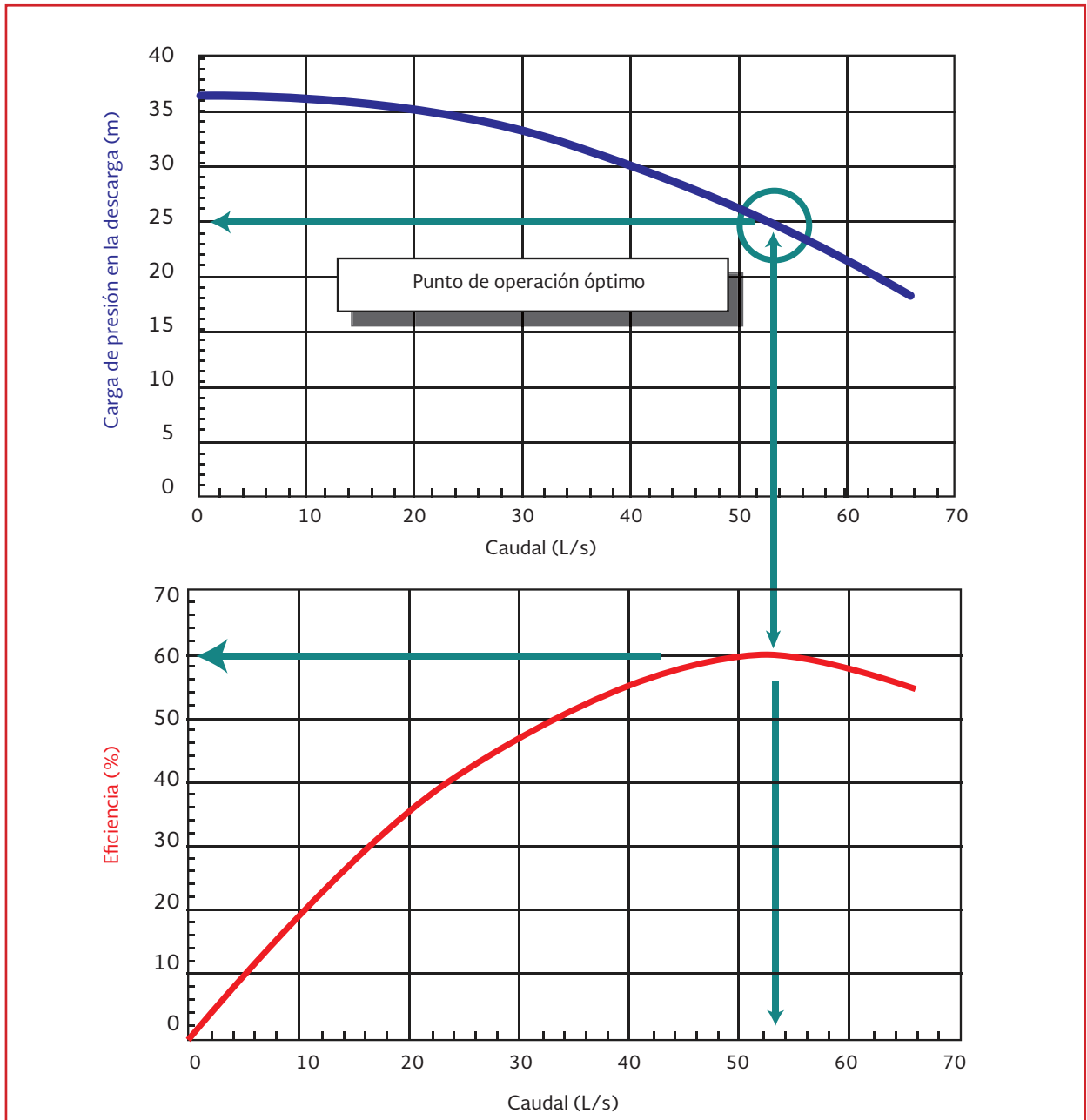


Ilustración 3.8 Comportamiento típico de una bomba: al disminuir el caudal bombeado se incrementa la presión del flujo en la descarga, además de disminuir notablemente la eficiencia de operación



3.2.1.4. Consideraciones para la propuesta de sectores

Se recomienda que la propuesta inicial de sectorización se base en las zonas de servicio actuales, ajustando aquellas que se encuentren desequilibradas y respetando en medida de lo

posible la operación de las zonas equilibradas y con un buen funcionamiento.

El tamaño de los sectores estará limitado únicamente por el gasto disponible de las captaciones de abastecimiento y de la capacidad de regulación de los tanques.

No existe límite mínimo ni máximo preestablecido en cuanto al número de usuarios, área o longitud de red. El uso de tanques de regulación para la distribución aumenta el número de usuarios que puede cubrir el gasto medio de una captación, por lo que se recomienda su rehabilitación y puesta en marcha cuando estén fuera de servicio.

Es recomendable evitar las inyecciones directas a red desde pozos. Si existe un tanque de regulación cercano y con suficiente capacidad es preferible proponer la distribución a través del mismo.

Es posible encontrar sectores que después de varias iteraciones no se puedan equilibrar debido al poco gasto disponible o a una pequeña o nula capacidad de regulación del sector. En estos casos se puede justificar la proyección de infraestructura nueva, como la construcción de un tanque de regulación o, en el peor de los casos, de una captación nueva.

La capacidad de la red de distribución para cubrir la demanda, tanto de caudal como de presión en cada sector propuesto, debe ser evaluada con un modelo de simulación.

Si el resultado de esta evaluación indica que en algún sector la capacidad de la red es insuficiente o que es muy complicada la regulación de presiones, se puede modificar la sectorización propuesta.

La capacidad de las líneas de conducción primaria que entregan el agua en bloque a los sectores propuestos será analizada también con el modelo de simulación.

3.2.1.5. Redistribución de Caudales en el Sistema

La redistribución de caudales propone sectores hidráulicos que suplirán las zonas de servicio actuales. El proceso es iterativo. Para comenzar es necesario proponer una sectorización y evaluar su balance volumétrico con el formato de la Tabla 3.6.

Utilizando las columnas del formato de la Tabla 3.6, se propone la primera sectorización aplicando el siguiente procedimiento:

1. Se propone un sector identificando la fuente de distribución principal (nombre del tanque o del pozo que inyecta a la red)
2. Se identifica la captación o captaciones de abastecimiento (pozos, manantiales, presas, etc.) que inyectan al tanque o directamente a la red
3. Utilizando el mismo criterio que en el balance volumétrico de la sección 3.1.6.5 del presente libro, se determina el gasto disponible para el sector propuesto
4. Se proponen las colonias o zonas identificadas de población, que serán abastecidas en este sector
5. Se ingresa el número de usuarios domésticos de cada colonia propuesta para el sector
6. Se calculan los habitantes en cada colonia o zona de población multiplicando sus usuarios por el índice de hacinamiento
7. Se calcula el gasto medio demandado por los habitantes utilizando la dotación de proyecto

Tabla 3.6 Ejemplo de formato de redistribución de caudales

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Sector hidráulico	Captación	Gasto disponible (L/s)	Colonias	Usuarios domésticos	Población (hab)	Gasto medio (L/s)	Suma Gasto medio (L/s)	Tipo de distribución	Gasto requerido (L/s)	Desequilibrio (L/s)
Sumas										

8. En esta columna se coloca la suma de los gastos medios de cada colonia o zona de población propuesta para el sector
9. Se especifica el tipo de distribución que tendrá el sector. Puede ser a través de un tanque de regulación (regulada), inyección directa a red desde la fuente de abastecimiento (directa) o mixta
10. Se calcula el gasto máximo que requerirá la población durante los meses más calurosos del año, tomando en cuenta su tipo de distribución, utilizando la Ecuación 3.9 y Ecuación 3.10
11. Se calcula el desequilibrio del sector propuesto con la Ecuación 3.11

$$Desequilibrio = \sum Q_{disponible} (3) - \sum Q_{requerido} (10)$$

Ecuación 3.11

Si existe un desequilibrio negativo en el sector (columna 11) se deberá disminuir el número de usuarios servidos o agregar alguna fuente de abastecimiento para aumentar el gasto disponible. Cuando la diferencia sea positiva y relativamente cercana a cero, se pasa a la definición del siguiente sector y se repiten los pasos para llenar las columnas 1 a la 11.

Todas las colonias y zonas de población deben quedar dentro de algún sector. Si la columna 11 del último sector muestra una diferencia negati-

va, los usuarios que se disminuyan de este sector o las fuentes que se agreguen para aumentar el gasto disponible pueden desequilibrar algún sector anterior, por lo que deberán añadirse o sustraerse respectivamente a los sectores contiguos y calcular nuevamente sus características.

La validez de los sectores alimentados por tanques reguladores depende de que estos últimos tengan capacidad suficiente para regular las variaciones horarias de la demanda. El cálculo de esta capacidad se detalla más adelante.

Este proceso se debe repetir hasta que todos los sectores, así como el balance volumétrico de la sectorización propuesta, presenten una diferencia positiva y cercana a cero. Además, la operación propuesta de los sectores deberá ser lo más sencilla posible y requerir un mínimo de infraestructura nueva.

3.2.1.6. Análisis de la capacidad de regulación de tanques por sector

El procedimiento consiste en calcular el coeficiente de regulación en cada zona, utilizando la curva típica de demanda de agua (ver sección 1.2.3) y la política de suministro de agua hacia el tanque. La capacidad requerida de almacenamiento del tanque, en metros cúbicos, será deter-

minada multiplicando dicho coeficiente de regulación por el gasto máximo diario del suministro.

El volumen resultante en el cálculo se compara con el volumen existente en el tanque de regulación. Si es mayor, el tanque tiene volumen suficiente para regular el gasto máximo horario y por lo tanto el funcionamiento del sector propuesto es adecuado; en caso de que resulte menor, se propondrá prioritariamente disminuir el tamaño del sector y en caso extremo, su ampliación cuando así lo permita la disposición de terreno y dinero.

3.2.2. ELABORACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA DE LA RED

Un modelo de simulación de una red de abastecimiento es una representación del funcionamiento hidráulico del sistema de distribución de agua potable de una ciudad real, verificable con mediciones de parámetros físicos.

El modelo de una red de distribución de agua potable se construye mediante nodos, tramos, condiciones de frontera e iniciales. Los nodos pueden ser simples cuando solo representan uniones de tubería, o bien, compuestos, cuando reproducen demandas de usuarios, fugas, tanques, depósitos, y cuerpos de agua (acuíferos, manantiales, presas, etc.). Los tramos pueden solo representar tubería, o también tramos con válvulas y equipos de bombeo. En la Ilustración 3.9 se muestra un ejemplo de un modelo hidráulico de un sistema de agua potable.

Las fases de la modelación de sistemas hidráulicos a presión se muestra en la Ilustración 3.10, donde se observa que la modelación se basa en los

principios básicos de la hidráulica: continuidad y cantidad de movimiento.

Así, la modelación hidráulica de redes de agua potable se realiza en flujo permanente o en periodos extendidos. Es decir, donde las variaciones de presión y velocidad son lentas en el tiempo y no se provocan efectos de aceleración en el flujo o elasticidad en la tubería y el fluido.

En la modelación de redes hidráulicas se aplican las dos leyes de Kirchoff, que son plasmadas en la Ecuación 3.12 y Ecuación 3.13.

$$\sum_{j=1}^m Q_{i,j} + Q_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{Ecuación 3.12}$$

$$\sum_{j=1}^m \Delta H_j = 0 \quad \text{Ecuación 3.13}$$

donde:

- $Q_{i,j}$ = gasto de la tubería j , que entra y sale del nodo i (L/s)
- Q_i = gasto de demanda extraído de la red en el nodo i (L/s)
- ΔH_j = pérdida de carga en la tubería j (m)

Aplicando estas ecuaciones en cada tramo y nodo 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 para obtener el valor de la carga hidráulica en cada nodo y la velocidad en cada tramo en condiciones de flujo permanente.

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 las curvas características de bombas, ecuación de la descarga de agua por un orificio a la atmósfera, etcétera.

Ilustración 3.9 Ejemplo de un modelo de una red de agua potable

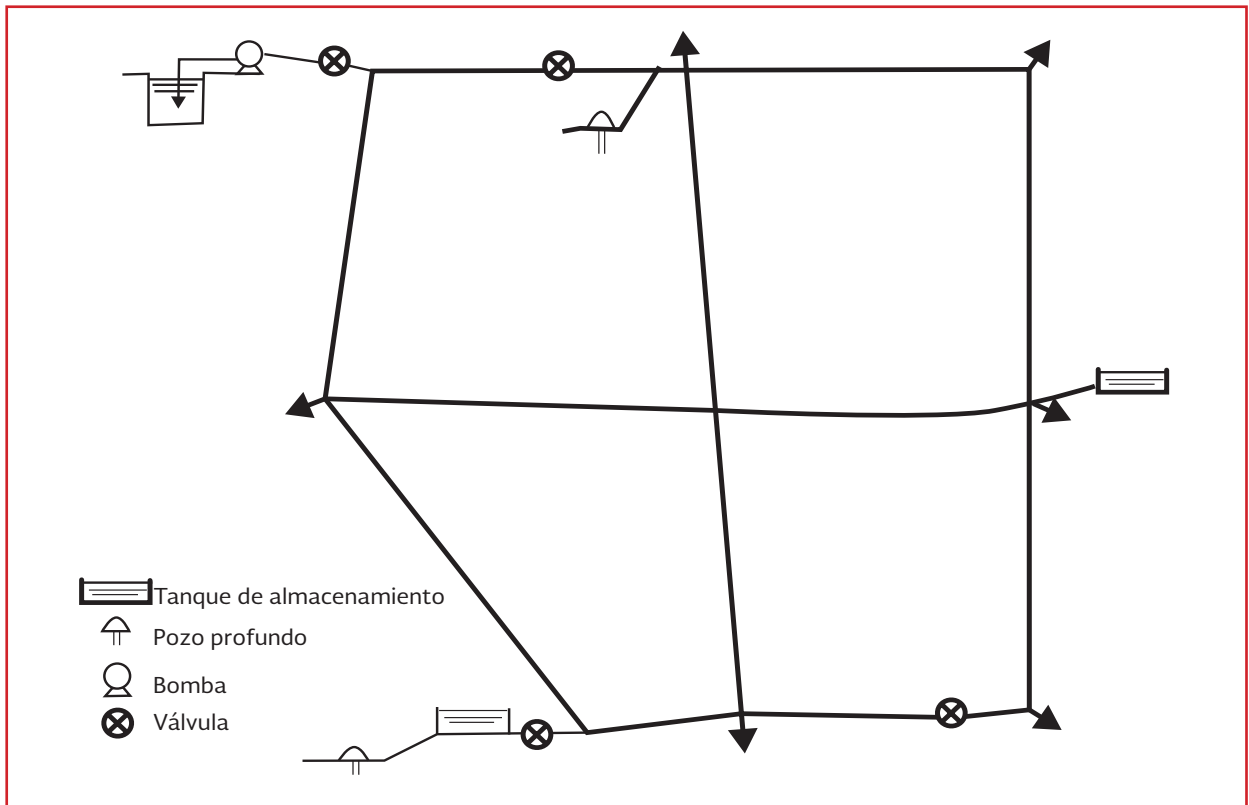
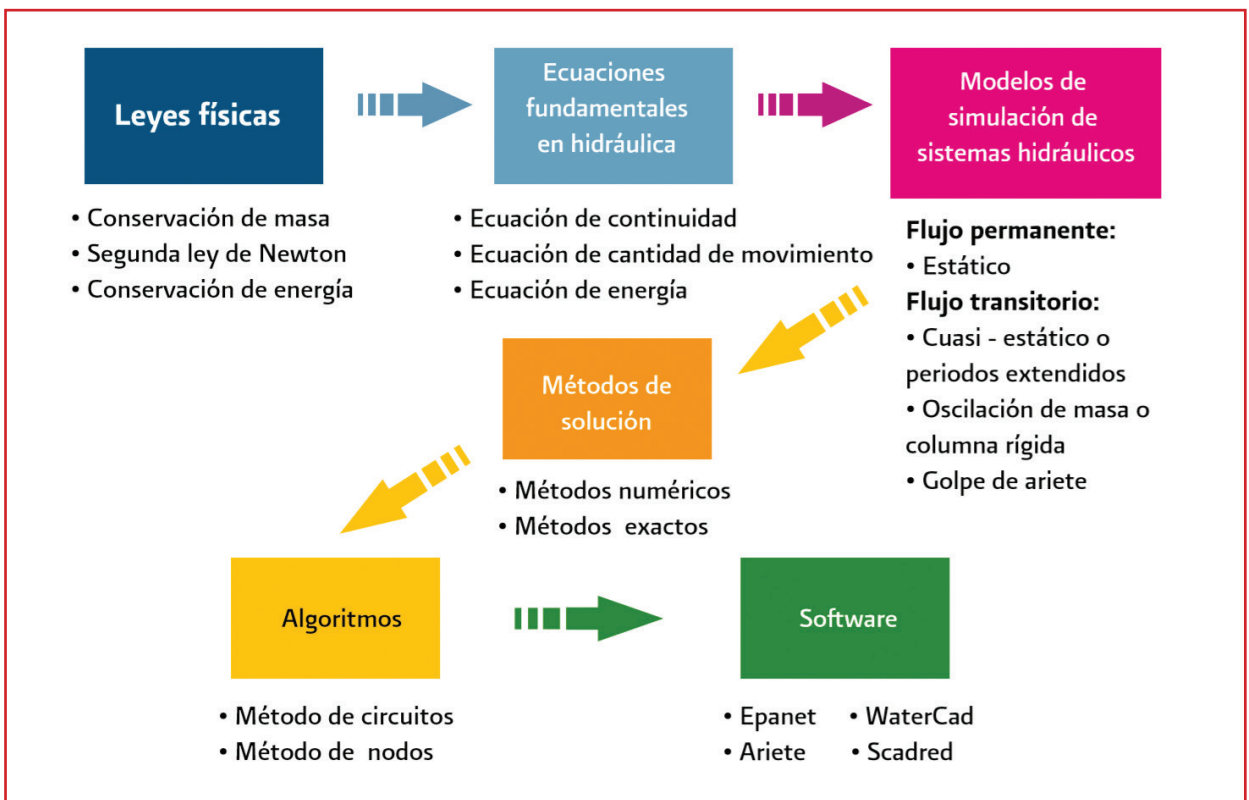


Ilustración 3.10 Fases de la modelación de los sistemas hidráulicos a presión



En cuanto a los consumos de los usuarios extraídos por tomas domiciliarias, se supone que en cada tramo del modelo todos ellos se concentran como extracciones en los nodos en forma proporcional a la longitud de la tubería representada, en áreas tributarias o a la densidad de usuarios.

Cuando se trata de modelación en periodos extendidos, se debe incluir una curva de variación horaria de la demanda en cada nodo con el fin de obtener las correspondientes variaciones de presiones y velocidades en la red.

Para conformar un modelo de simulación hidráulica se siguen los pasos siguientes:

1. Colocar un mapa de fondo de la traza urbana de la ciudad, sobre el que se montará el modelo de simulación. Este fondo debe estar georeferenciado y actualizado, de acuerdo con los lineamientos especificados en la sección 3.1.6.3 del libro
2. Dibujar el esqueleto de la red con todos sus elementos utilizando como base la traza de nodos y tramos
3. Capturar los datos de cotas topográficas y demandas en los nodos
4. Capturar los datos de diámetro, longitud y rugosidad en todos los tramos de tubería
5. Capturar los datos de los elementos frontera, tales como curvas de bombas, niveles de tanques, dimensiones de depósitos, etcétera
6. Realizar corridas de prueba de funcionamiento del modelo

Un punto importante es el ajuste de modelos de simulación hidráulica de redes de agua potable, para que reproduzca las condiciones reales.

Los resultados del modelo pueden diferir de la realidad debido a errores o suposiciones en la conformación del modelo y/o en la elección de los datos capturados. En sí mismo el modelo de simulación no podrá dar soluciones exactamente iguales a los valores reales, ya que el modelo tiene hipótesis intrínsecas en las ecuaciones utilizadas para su elaboración. Algunos factores que alteran la veracidad de los valores arrojados por el modelo son:

- Errores en la rugosidad de la tubería por su edad o material
- Errores en los diámetros y longitudes de la tubería por su desconocimiento en el plano
- Suposiciones equivocadas en la asignación de demandas de agua en los nodos
- Existencia de fugas ocultas en la red
- Errores en las caracterizaciones hidráulicas de accesorios (válvulas, codos, reducciones y ampliaciones de tubos)
- Errores en los datos de las curvas características de los equipos de bombeo

Por lo tanto, todo modelo de simulación hidráulica de redes de agua potable debe ajustarse en lo posible a las condiciones reales, las cuales pueden ser monitoreadas con una campaña de medición utilizando los procedimientos de la sección 1.2 del presente libro. Se recomienda consultar el libro de *Modelación hidráulica y de calidad del agua en redes de distribución*, del MAPAS.

3.2.3. ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LA RED SECTORIZADA

Una vez creado y calibrado el modelo de simulación de la red de agua potable, se utili-

zará como base para el análisis hidráulico de las condiciones propuestas de sectorización. Los pasos para el análisis hidráulico de la red sectorizada son:

- Definición de condiciones generales de análisis
- Representación del esquema de sectorización
- Optimización del funcionamiento de la red de distribución

3.2.3.1. Definición de condiciones generales de análisis

Las condiciones generales que hay que definir son el periodo del análisis y la demanda base por nodo:

1. Periodo del análisis. La red sectorizada se puede revisar en flujo permanente o en periodos extendidos de al menos 24 horas
2. Análisis en flujo permanente. Cuando se analice por flujo permanente se deberán modelar dos escenarios: el primero considerando que los usuarios consumen el gasto medio, y en el segundo, considerando el gasto máximo horario del día más caluroso del año. Con estos análisis se obtendrán resultados del comportamiento de la red en condiciones normales para evaluar zonas de alta presión y en condiciones de demanda máxima para identificar zonas de baja presión
3. Análisis en periodos extendidos; para este análisis se deberá definir una curva de variación de la demanda en cada nodo de consumo y las dimensiones de los tanques de regulación (ver sección 1.2.3 del libro). En caso de no contar

con curva de variación se utilizará la curva presentada en el libro de *Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado*, del MAPAS (ver Ilustración 3.11). Con este tipo de análisis se puede evaluar el comportamiento del nivel en los tanques y la posibilidad de paros en hora punta

4. La demanda base por nodo de consumo deberá representar las condiciones de la red sectorizada. La asignación de demanda a los nodos puede hacerse por los métodos tradicionales de área tributaria o longitud de tubería. En sectores donde la distribución de nodos es relativamente homogénea (Ilustración 3.12) y considerando que la distribución de usuarios también lo es, la asignación de demanda puede realizarse por sector de acuerdo con la Ecuación 3.14

$$Demanda \ x \ nodo = \frac{Dotación \ diseño \ (Población \ sector \ n)}{86 \ 400 \ (Nodo \ Nodos \ sector \ n)}$$

Ecuación 3.14

3.2.3.2. Representación del esquema de sectorización

Los cambios que se realicen en el modelo para representar el esquema de sectorización deben ser identificados, etiquetados y cuantificados ya que se utilizarán para generar un catálogo de conceptos y volumetría para realizar las obras físicas de sectorización.

Los principales aspectos que se representan son la definición y representación del esquema de entrega de agua en bloque y la delimitación y aislamiento de sectores. Se recomienda realizar este proceso de manera ordenada, representan-

Ilustración 3.11 Curva de variación de demanda típica para diversas ciudades de México

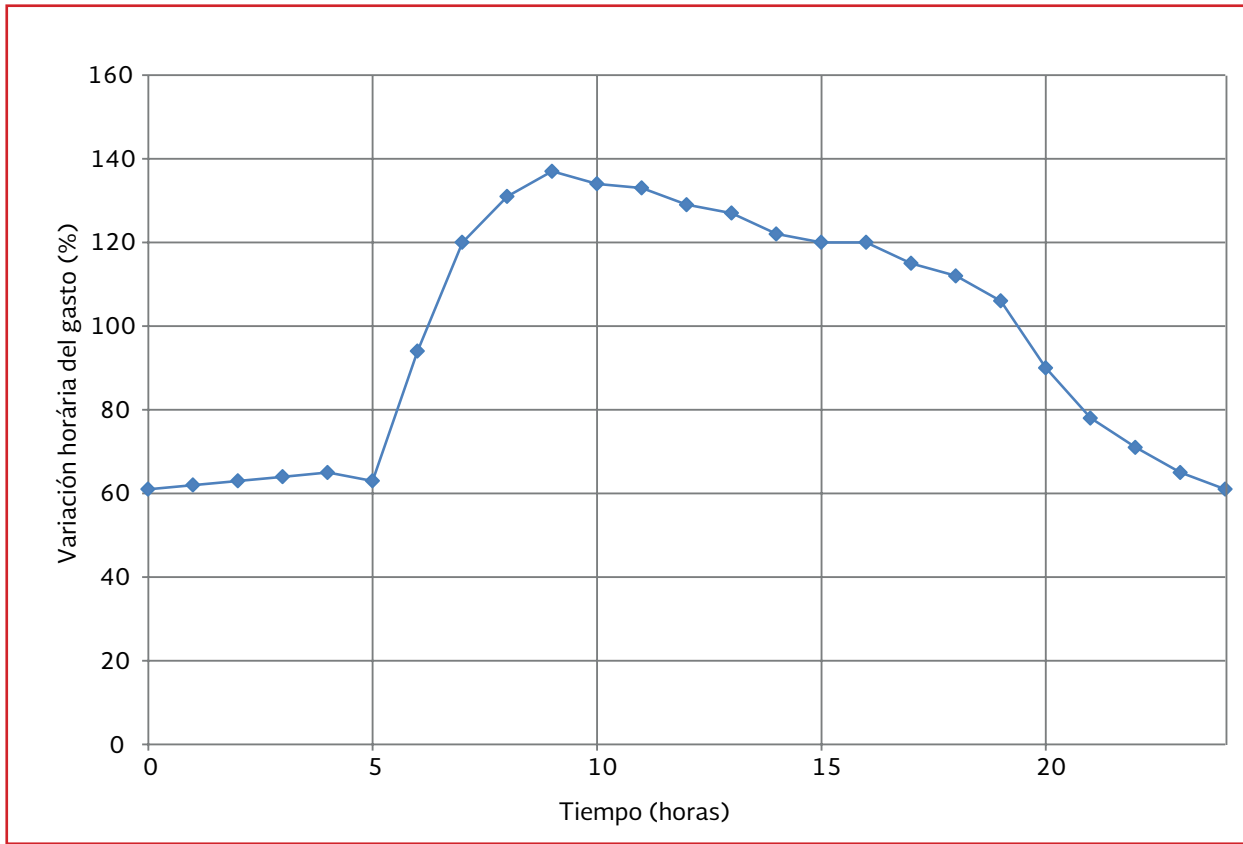
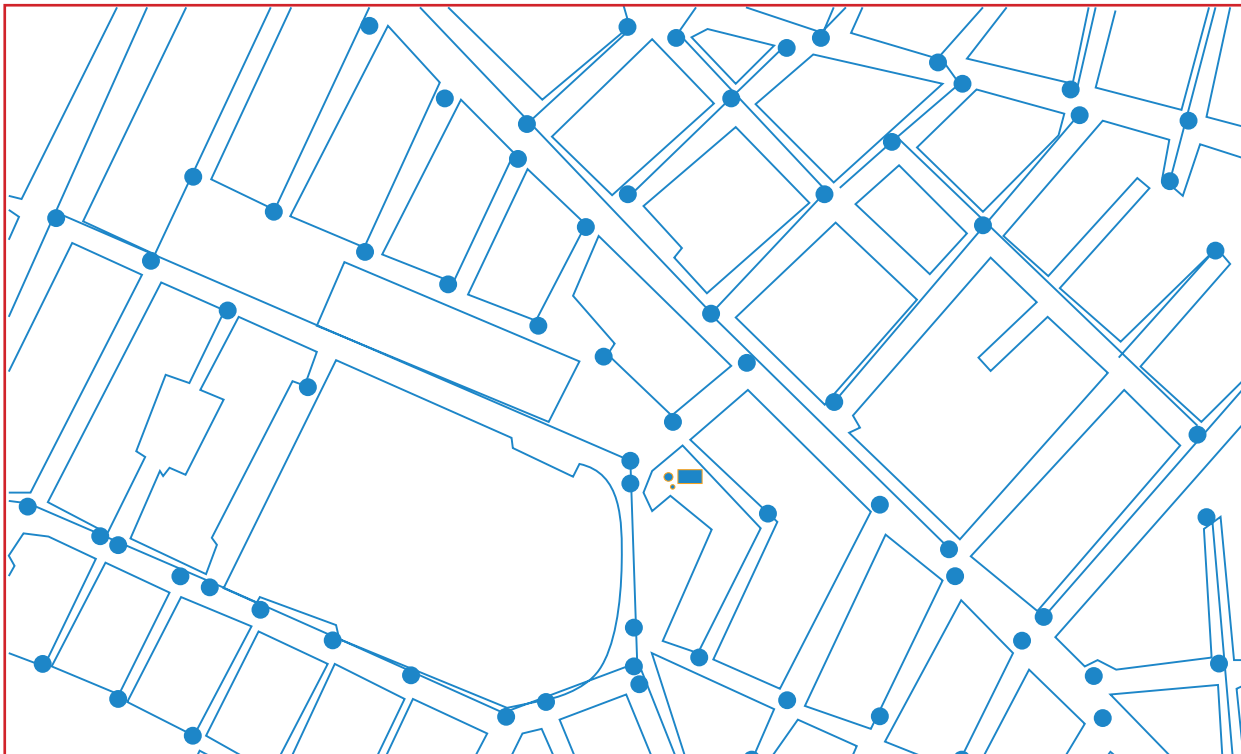


Ilustración 3.12 Ejemplo de sector con distribución de nodos homogénea



do, aislando y verificando el funcionamiento de un sector cada vez.

1. Definición y representación del esquema de entrega de agua en bloque. Se debe diseñar un esquema de entrega de agua en bloque que asegure que cada fuente de abastecimiento funcione de acuerdo con la redistribución de caudales propuesta. El esquema deberá representar las fuentes de abastecimiento, líneas de

conducción, tanques y puntos de entrega en cada sector (Ilustración 3.13). El esquema deberá utilizar al máximo la infraestructura existente

A partir del modelo de simulación creado, se identificarán los cambios necesarios para representar el esquema de entrega de agua en bloque. Los cambios incluyen cortes de derivaciones en ruta, modificación de cruceros y la instalación

Ilustración 3.13 Ejemplo de esquema de entrega de agua en bloque

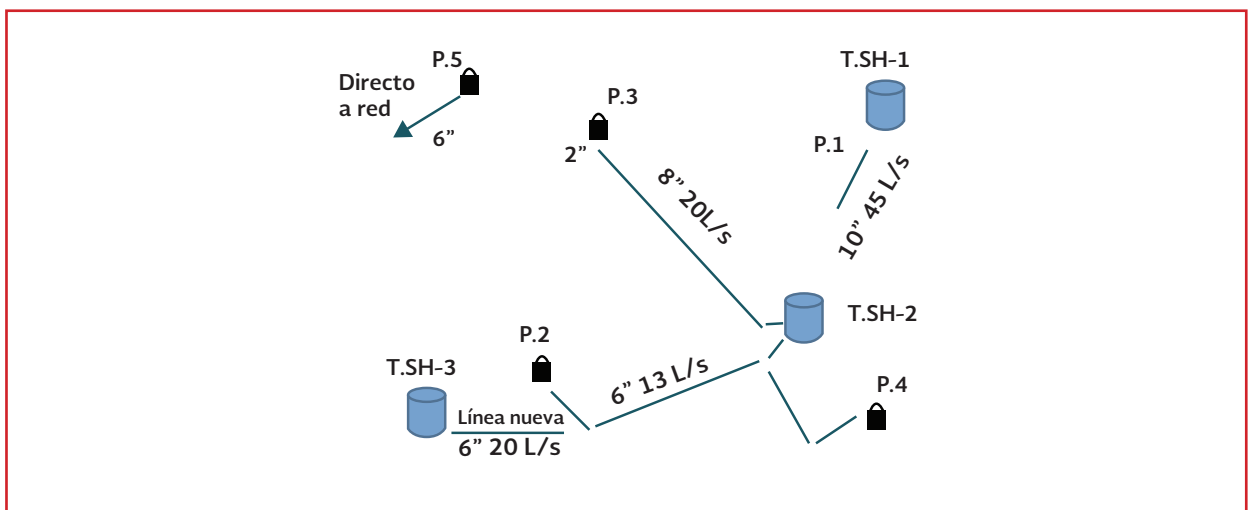
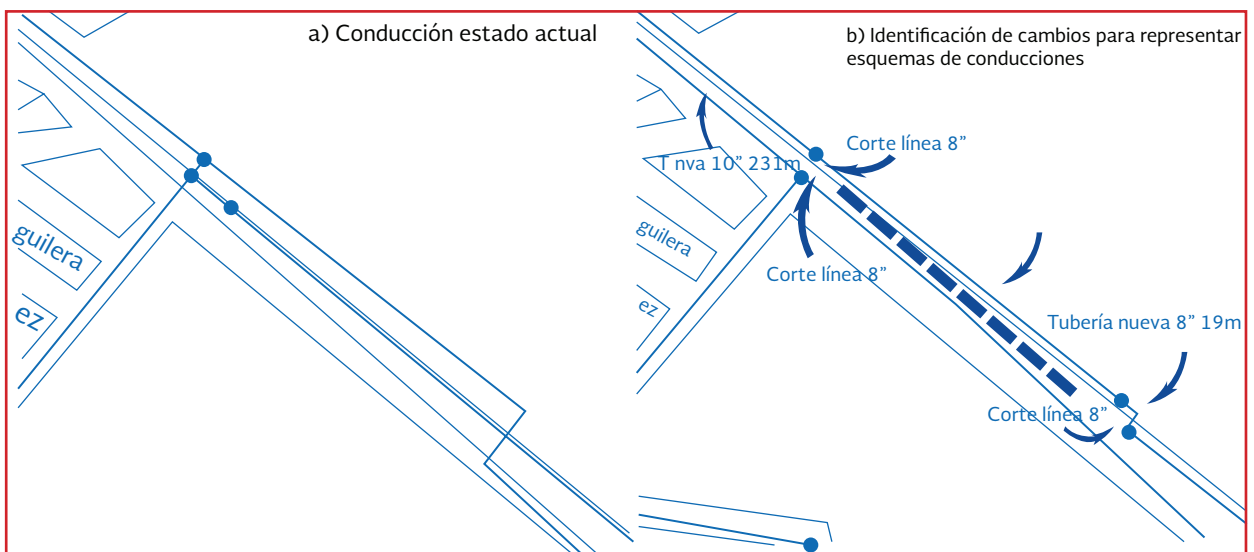


Ilustración 3.14 Ejemplo de aislamiento de conducciones para representar esquema de entrega de agua en bloque



de líneas de conducción nuevas. Cada cambio deberá ser etiquetado para la posterior generación de volumen de obra (Ilustración 3.14)

2. Delimitación y aislamiento de sectores. Se deben identificar los cambios necesarios para que cada sector funcione de acuerdo con la redistribución de caudales propuesta en la sección 3.2.1.2 del

presente libro. Deben identificarse los límites de cada sector para definir los puntos en que se realizarán los cortes como se muestra en la Ilustración 3.15, utilizando las herramientas del software de modelación

Para verificar el aislamiento del sector, se cerrarán o apagarán las fuentes de suministro de agua al mismo y se

Ilustración 3.15 Identificación de límites de sector y definición de puntos de corte

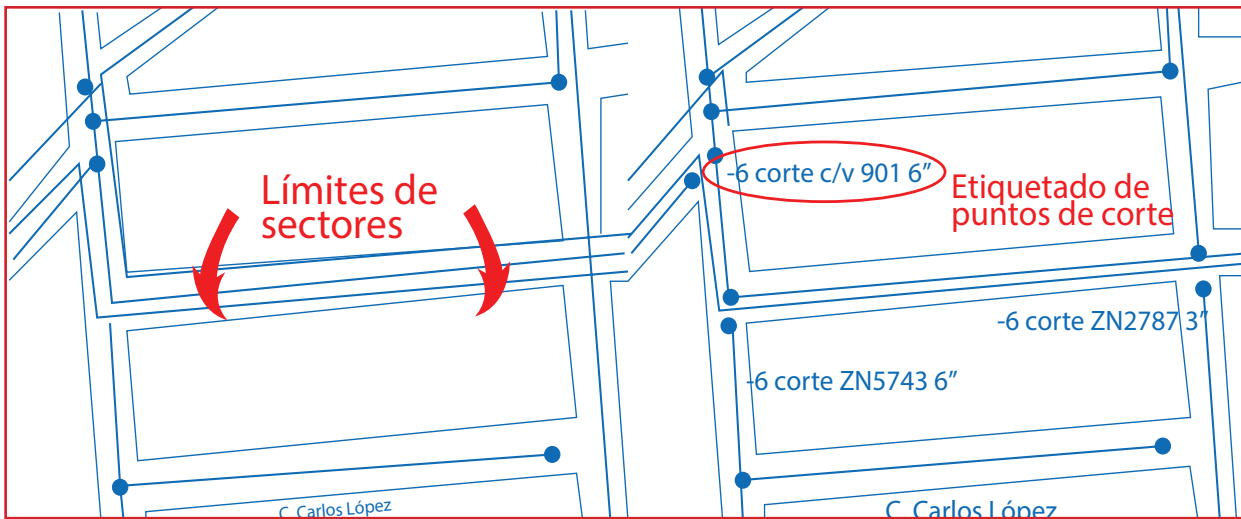
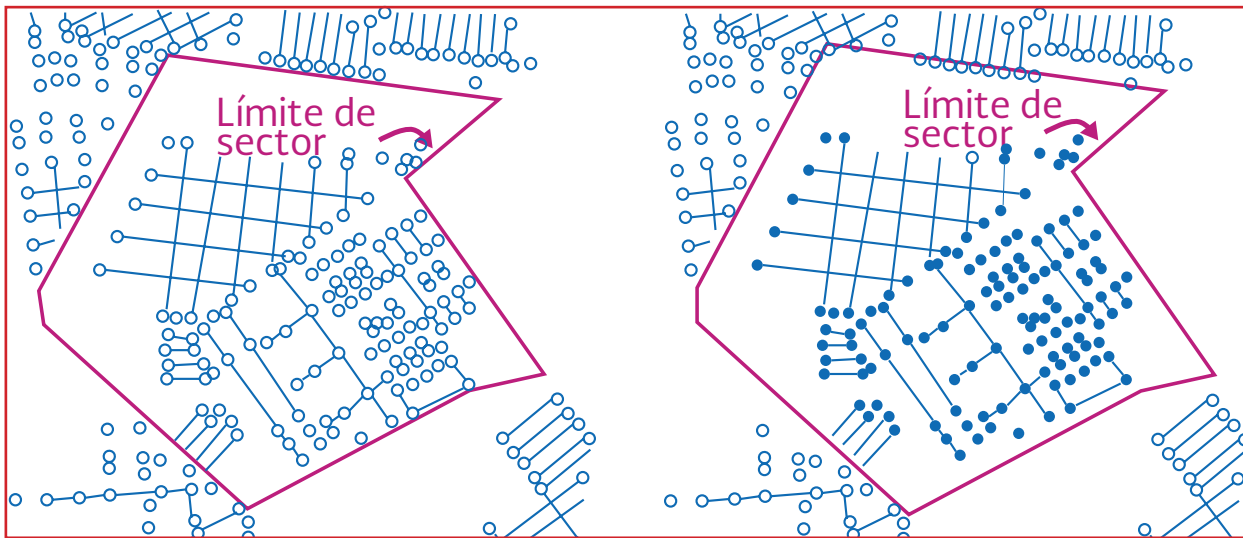


Ilustración 3.16 Comprobación de aislamiento de sector



ejecutara el cálculo del modelo. El resultado esperado es que los nodos del sector en prueba no reciban gasto (Ilustración 3.16)

Una vez verificado el aislamiento de cada sector, se procede a la optimización del funcionamiento hidráulico de la red. Los criterios para optimizar la red de distribución se presentan en la sección siguiente.

3.2.3.3. Optimización del funcionamiento hidráulico de la red de distribución

A partir del punto de suministro de agua al sector, la red de distribución debe ser capaz de entregar el gasto demandado en cada nodo con presiones mayores a 1.0 kg/cm^2 y menores a 5.0 kg/cm^2 , tanto en las condiciones de máxima demanda, como en las condiciones de operación media y mínima. A continuación damos algunas recomendaciones para controlar presiones mínimas y máximas.

1. Control de presiones bajas.

- a) Sistemas por gravedad con cotas menores al tanque de regulación. Cuando existen zonas con presiones menores a 1 kg/cm^2 en este tipo de sistema, se utilizarán las herramientas del software de modelación para identificar la tubería que abastece dicha zona y que tienen una pérdida unitaria elevada debido a altas velocidades. Las tuberías con velocidades mayores a 1.5 m/s tendrán pérdidas unitarias importantes

Para mejorar las presiones, se apoyará el suministro a la zona con baja presión mediante la instalación de tubería nueva, cambio de diámetro

en tubería con velocidades altas o conexiones de cruceros desconectados. El objetivo es generar la menor cantidad de obra posible. Este tipo de mejoras aplican para este y todos los tipos de sistemas que se presentan a continuación

- b) Sistemas por gravedad con cotas mayores al tanque de regulación. Cuando existen zonas con cotas mayores al desplante del tanque de regulación, se requerirá de rebombes instalados en el mismo tanque de regulación para zonas cercanas al mismo y rebombes en línea tipo booster para zonas lejanas a este. Las presiones en estas zonas serán reguladas mediante el diseño de una carga apropiada de trabajo del equipo o mediante el uso de variadores de velocidad para mantener una carga constante
- c) Sistemas con bombeo directo. Las presiones en estas zonas serán reguladas mediante el diseño de una carga apropiada de trabajo del equipo o mediante el uso de variadores de velocidad para mantener una carga constante. Habrá que tener cuidado de no generar zonas de alta presión al aumentar la carga de trabajo de un equipo de bombeo para abastecer otra zona con presiones bajas

2. Control de presiones altas.

En sectores con diferenciales de cotas mayores a 50 metros será necesario el control de presiones en zonas que excedan el máximo recomendado. Para el control de altas presiones, se recomienda el uso de válvulas reductoras de presión automáticas, las cuales se ubicarán en el punto donde tengan mayor área de in-

fluencia y genere la menor obra posible. El funcionamiento de estas válvulas deberá ser propuesto y validado con el modelo de simulación. Todos los cambios realizados para la optimización de la red deberán ser etiquetados e identificados en el modelo de simulación hidráulica y en los planos

3.2.4. ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LAS CONDICIONES PARA ENTREGA DE AGUA EN BLOQUE

Las conducciones deberán ser evaluadas por flujo permanente o periodo extendido para asegurar que los sistemas puedan cumplir las condiciones requeridas por el esquema de entrega de agua en bloque.

En cada sistema de conducción se debe tener cuidado de representar lo más apegado a la realidad los siguientes datos, ya que su variación genera diferencias considerables en los resultados:

- Curva de gasto-carga de cada equipo de bombeo
- Cota de desplante del equipo de bombeo
- Nivel dinámico de succión de la bomba
- Cota de la descarga a tanques
- Diámetro y longitud de la tubería
- Ubicación y condiciones de demanda de inyecciones directa a la red (si existen)

Para agilizar la obtención de resultados y permitir la prueba de diferentes escenarios completos,

las conducciones serán analizadas utilizando el modelo de simulación hidráulica integrado con la red de distribución.

3.2.4.1. Análisis hidráulico en flujo permanente de las conducciones

El análisis hidráulico en flujo permanente consiste en definir de manera conjunta los puntos que se describen a continuación:

1. Diseño de equipos de bombeo. El gasto de extracción se define por la capacidad del pozo o por la demanda, en caso de rebombes. La carga de trabajo se conforma por la diferencia entre el nivel dinámico de la fuente, el nivel de la descarga en el tanque y las pérdidas generadas por la conducción y piezas especiales (Ilustración 3.17). Con el uso del modelo de simulación se puede optimizar las condiciones de diseño mediante la realización de varias pruebas
2. Uso de válvulas de control automático. Cuando dentro del esquema de entrega de agua en bloque existe algún equipo de bombeo que entregue a dos o más tanques, es necesario el uso de válvulas reguladoras de caudal (Ilustración 3.18). Las válvulas reguladoras deberán ubicarse en las entradas de los tanques para facilitar su operación, mantenimiento y seguridad. El gasto de trabajo de cada válvula deberá corresponder al diseño del esquema de entrega de agua en bloque

Ilustración 3.17 Definición de la carga de diseño para equipos de bombeo

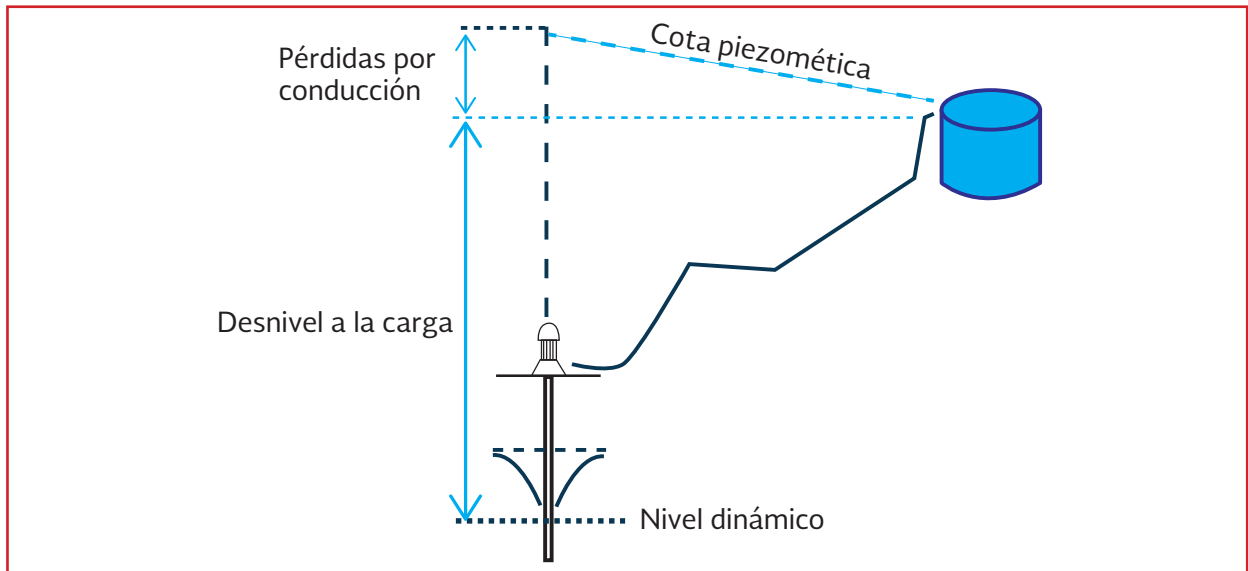
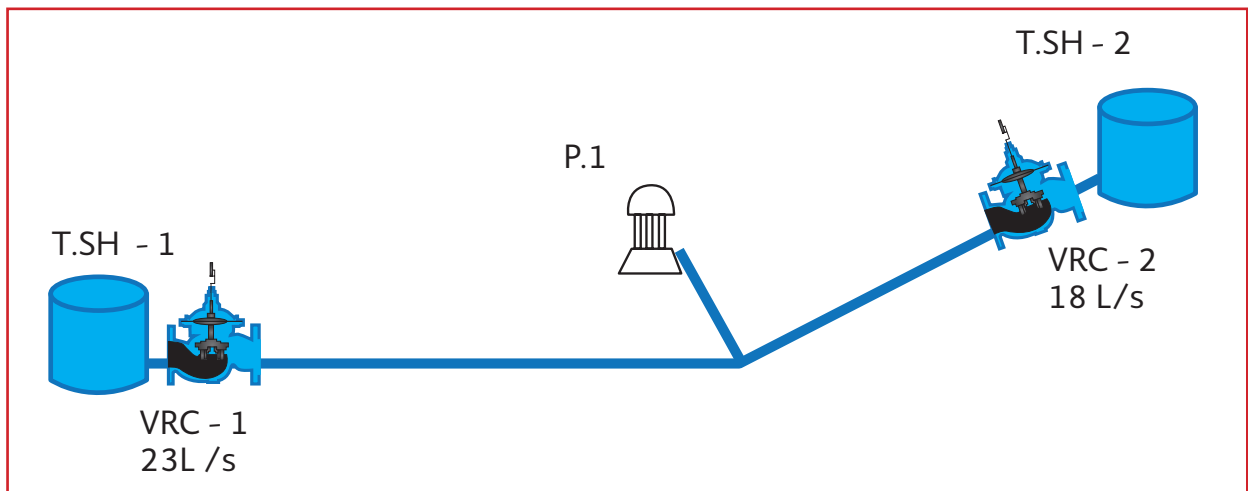


Ilustración 3.18 Uso de las válvulas automáticas para regulación del caudal



3. Control de velocidades y presiones. Si la velocidad en la tubería es mayor a 2.5 m/s, se evalúa el aumento del diámetro de la conducción. Las presiones a lo largo de la conducción no deberán exceder el límite máximo de resistencia, el cual dependerá del material de la tubería y de los accesorios instalados a lo largo de la conducción. En caso de ser mayores, deberá considerarse la instalación de un rebombeo intermedio

3.2.4.2. Análisis hidráulico de las conducciones en periodos extendidos

Cuando existe un sistema de conducción desde un equipo de bombeo hasta un tanque, el cual entrega, en algún punto específico, a la red, se puede realizar un análisis en periodo extendido.

Para el correcto funcionamiento de la conducción es necesaria la instalación de una válvula sostenedora de presión, la cual será calibrada

para mantener la presión aguas arriba para permitir que el sistema siga teniendo la capacidad de entregar hasta el tanque (Ilustración 3.19).

Este tipo de sistemas puede analizarse junto con la red de distribución en la sección 3.2.3.3, para tomar en cuenta las características de demanda de la zona a la que se inyecta de manera directa (Ilustración 3.20).

El sistema puede analizarse también de manera aislada, colocando un nodo de consumo aguas debajo de la válvula sostenedora de presión, el cual represente el gasto demandado por toda la zona, así como la variación de la demanda horaria (Ilustración 3.21).

El análisis en periodos extendidos de los sistemas de conducciones ofrece algunas ventajas, como las que se presentan a continuación.

Cuando se analiza el sistema de conducción entregando a un tanque de regulación, que descarga a una red de distribución bien delimitada, el análisis en periodo extendido en los modelos de simulación permite evaluar el comportamiento del nivel de agua en el tanque de regulación.

De esta manera se puede establecer el nivel óptimo inicial del tanque para que, en condiciones de operación normales, no llegue a vaciarse o a desbordarse. El análisis en periodo extendido en algunos programas de cómputo de simulación hidráulica permite establecer leyes de control para operar válvulas o equipos de bombeo de manera que se representen distintas condiciones de operación durante el día, como puede ser el paro de equipos de bombeo o la apertura y cierre de válvulas para entregar a distintos tanques a lo largo del día.

3.2.5. ESTRATEGIAS PARA LA PUESTA EN MARCHA DEL PROYECTO DE SECTORIZACIÓN

La implementación y puesta en marcha de un proyecto de sectorización requiere procedimientos técnicos y logística de actividades que implican un alto nivel de ingeniería aplicada. Por esta razón, las secciones que siguen del libro desarrollan algunas estrategias generales para la puesta en marcha de la sectorización.

3.2.5.1. Programa de construcción, instrumentación y saturación de sectores

En primer lugar, se deberán recopilar, catalogar y cotizar todos los trabajos requeridos para la completa implementación del proyecto de eficiencia hidráulica. Estas categorías y el orden para su ejecución son:

1. Construcción de sectores hidráulicos
2. Modificaciones en la red para el aislamiento y funcionamiento de sectores y conducciones
3. Prueba de cierre
4. Instrumentación de sectores hidráulicos
5. Suministro e instalación de válvulas de control automático
6. Suministro e instalación de equipos de bombeo
7. Suministro e instalación de equipos de mejora energética
8. Saturación y puesta en marcha de sectores
9. Aislamiento definitivo de sectores
10. Saturación de sectores y subsectores
11. Implementación de programas de reducción de fugas

Ilustración 3.19 Función de válvula sostenedora de presión

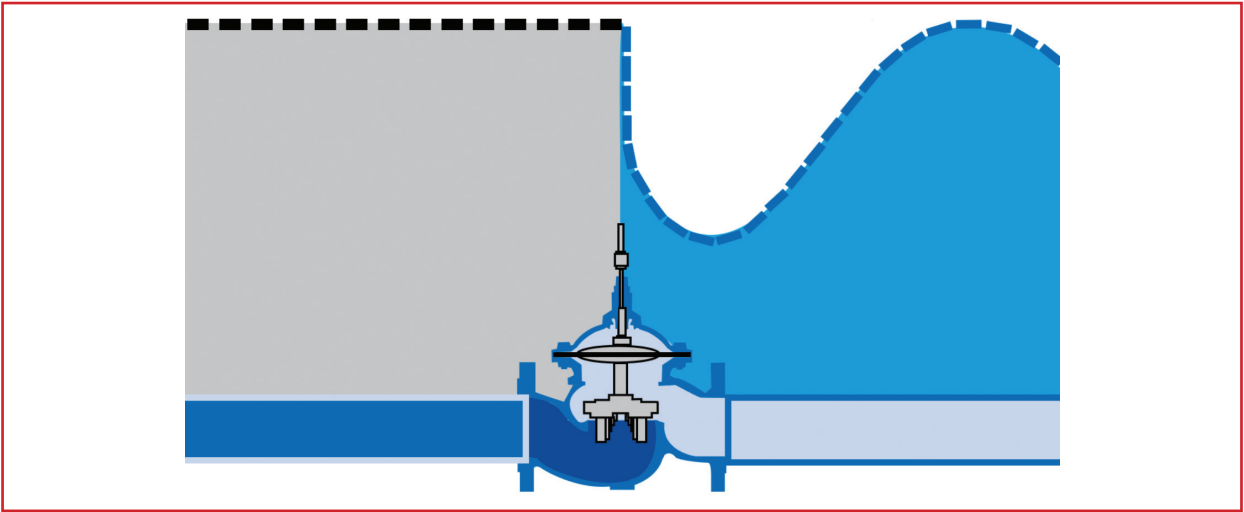


Ilustración 3.20 Análisis del sistema de conducción con entrega directa a red en ruta

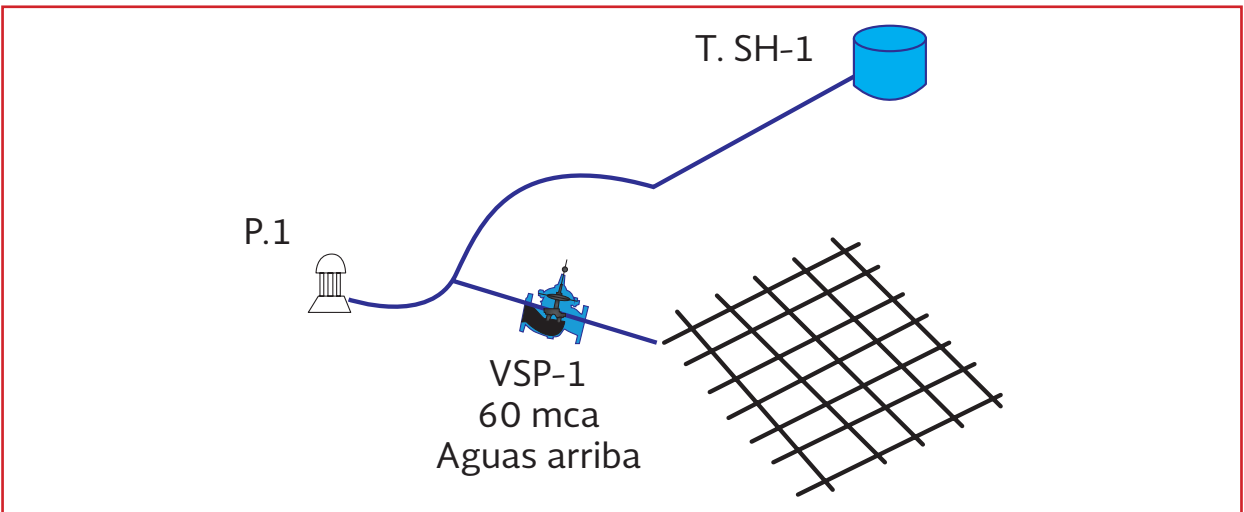
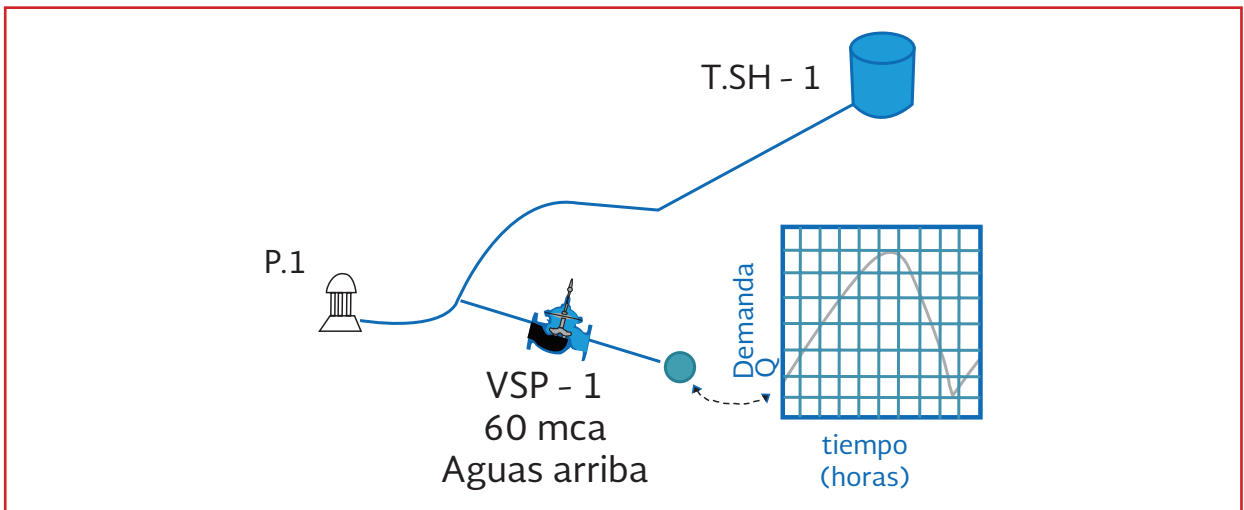


Ilustración 3.21 Análisis de sistema con representación de la zona de influencia como un nodo de consumo



Para cada una de las categorías deberá definirse su costo total, tiempo de entrega (en los conceptos que aplique) y tiempo de instalación o construcción. Hay que tener en cuenta también los tiempos de licitación y adjudicación de obra cuando sea necesario.

El principal factor que determina la programación e implementación del proyecto es la capacidad del organismo operador para disponer de recursos económicos. Esta capacidad definirá si la implementación se realizará de manera lineal, sector por sector o de manera paralela, implementando varios sectores a la vez.

La elección del orden en que cada sector se implementará depende de diferentes variables que el organismo operador debe valorar y jerarquizar. Las variables principales son:

- Inversión requerida para la puesta en marcha de cada sector
- Porcentaje de población beneficiada por la puesta en marcha
- Potencial de ahorro energético obtenido por la puesta en marcha
- Tiempo requerido para la implementación y puesta en marcha

Una vez definido el orden de implementación de sectores, se elabora el diagrama de flechas y se asignan tiempos y recursos a cada actividad, basado en las características de cada categoría definida anteriormente. Así se obtiene la ruta crítica de la implementación del proyecto (Ilustración 3.22).

En el diagrama de flechas se establece el orden y secuencia en que las actividades deberán realizarse, así como las fechas de inicio y final. El diagrama de flechas deberá tomarse como guía

para la implementación y deberá actualizarse y modificarse de acuerdo con los resultados e imprevistos que se presenten.

A partir del diagrama de flechas se deberá realizar un calendario de actividades, en el que se identifiquen los periodos en los que zonas específicas de la red podrían quedarse sin servicio debido a las pruebas de aislamiento. Con esta información se programarán avisos oportunos a los usuarios para que puedan tomar previsiones.

3.2.5.2. Construcción de sectores hidráulicos

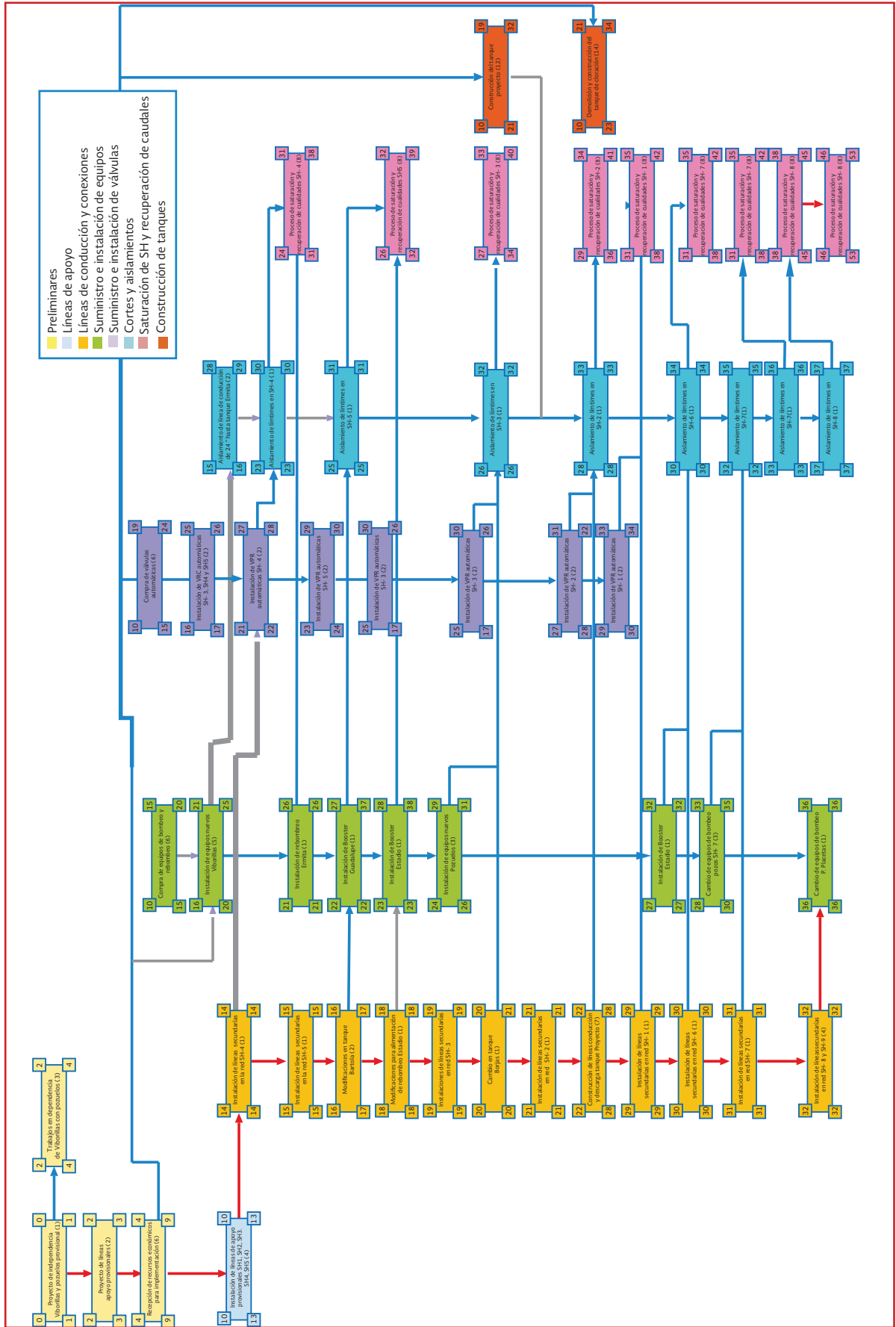
En esta etapa de la implementación se incluyen todos los trabajos relacionados con el aislamiento y conformación de sectores hidráulicos y del esquema de entrega de agua en bloque.

En particular se incluyen los trabajos de:

- ***Cortes y modificaciones de cruceros para el aislamiento de sectores.*** En este concepto se incluyen todos los trabajos relacionados con el establecimiento físico de los límites de sectores. Se recomienda realizar cortes definitivos en la red (Ilustración 3.20) para los trabajos de aislamiento, ya que se ha observado que la instalación y cierre de válvulas para el aislamiento definitivo de sectores puede ocasionar que se pierda el control del aislamiento, derivando en su mal funcionamiento.

Las preparaciones para el apoyo entre sectores para resolver eventualidades deberán proyectarse en el esquema de entrega de agua en bloque (sección 3.2.4 del presente libro). Deberá evitarse en la medida de lo posible hacer conexiones

Ilustración 3.22 Ejemplo de diagrama de flechas y ruta crítica



entre las redes de distribución de los sectores (Ilustración 3.24).

- **Cortes y modificaciones de líneas para el aislamiento de conducciones.** Cuando un sistema de conducción funciona directo entre la fuente y un tanque, es necesario eliminar todas las tomas y derivaciones en ruta que existan en la conducción ya que estas generan una pérdida importante de carga que podría disminuir o incluso impedir que el tanque reciba el gasto proyectado.

Los trabajos relacionados con este concepto se deben realizar antes de la instalación de nuevos equipos de bombeo, ya que, debido a las tomas en ruta, el equipo podría trabajar fuera de su rango de funcionamiento eficiente y no cumplir con el gasto requerido.

- **Instalación de tubería nueva para el correcto funcionamiento de sectores.** Los trabajos relacionados con este concepto tienden a ser más numerosos y laboriosos que los anteriores. Por esta razón se recomienda manejarlos como una partida independiente a los cortes y aislamientos con su propio frente de trabajo. Dentro de este concepto se deben identificar tuberías que son indispensables para cubrir zonas que pueden quedar sin alimentación debido a los trabajos de aislamiento. La instalación de esta tubería deberá realizarse antes de los cortes definitivos.
- **Construcción y rehabilitación de infraestructura (tanques, rebombeos, cajas de válvulas).** En este concepto se incluyen los trabajos de obra civil y fontanería ge-

neral para el uso de infraestructura nueva o existente, como pueden ser tanques reguladores, cajas rompedoras de presión, rebombeos y cajas para la instalación de válvulas de control automático. Debido a la larga duración de la obra civil, el inicio y fin de estos trabajos deberán programarse con suficiente holgura para evitar que retrasen la instalación de equipos electromecánicos, válvulas o incluso la puesta en marcha del sector.

3.2.5.3. Instrumentación de sectores hidráulicos

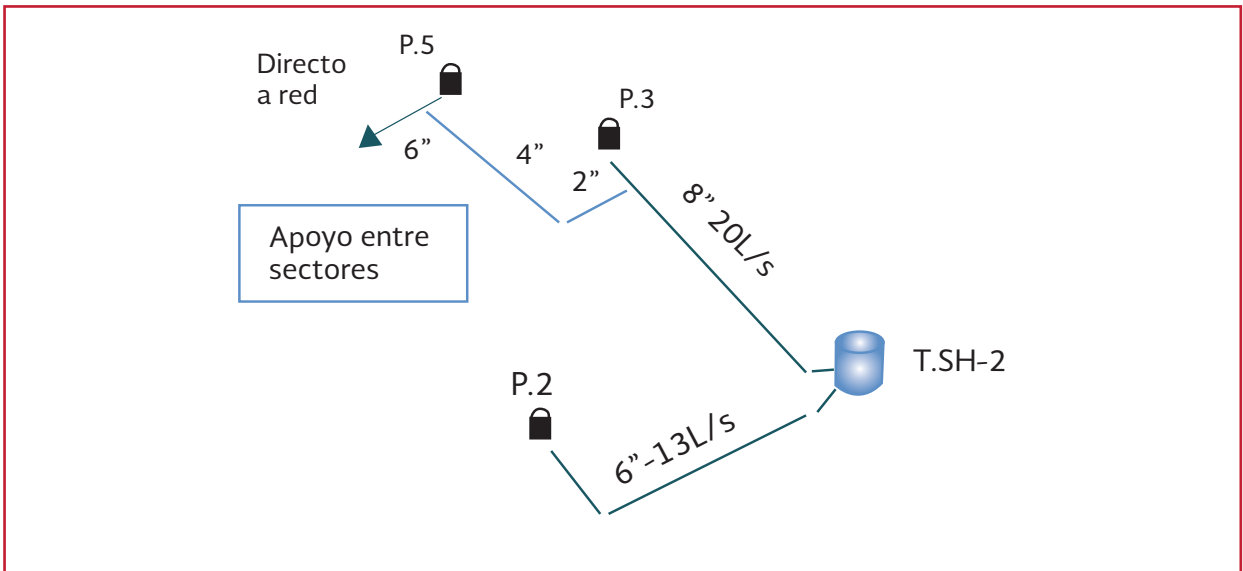
La instalación de los equipos de bombeo, válvulas automáticas y equipo de mejora energética debe ser programada para realizarse cuando los trabajos de obra civil y fontanería de la construcción de sectores se encuentren terminados. Para este efecto es necesario tomar en cuenta los tiempos de entrega de cada uno de los equipos para evitar el retraso de la puesta en marcha de los sectores.

Para las válvulas de control automático que se instalen sobre calles o avenidas de manera subterránea o en predios que no pertenezcan al organismo operador, deberá construirse una caja de válvulas con espacio suficiente que permita su mantenimiento, operación y toma de datos para su calibración (consultar el libro *Diseño de redes de distribución de agua potable*, del MAPAS). Para el mantenimiento de las válvulas, se recomienda el uso de un *bypass* que permita el acceso de flujo a la zona en caso de eventualidades o mantenimiento.

Ilustración 3.23 Trabajos de aislamiento de sectores



Ilustración 3.24 El apoyo entre sectores deberá planearse en el esquema de entrega de agua en bloque





4

PROYECTOS DE EFICIENCIA INTEGRAL

En esta sección se expondrá la relación que existe entre el consumo, el deterioro de los equipos de bombeo, la ocurrencia de fugas en la tubería de la red, el envejecimiento de las conducciones y la inadecuada operación para distribuir el agua a los usuarios. Además, se muestra la estructura básica de un Proyecto de Eficiencia Integral (PEI), explicando los alcances, objetivos y metas, el proceso metodológico, las herramientas, y los resultados que proporciona, con el fin de que el lector aprecie en forma global el contenido de dicho proyecto y visualice el contexto del presente libro.

El Proyecto de Eficiencia Integral está enfocado en el manejo combinado de las eficiencias física e hidráulica, que fueron desarrolladas en los capítulos anteriores. Las eficiencias aplicadas en la forma que aquí se propone aumentan los ahorros de agua y energía y mejora el funcionamiento hidráulico de la red. Como una opción, se describe una estrategia general recomendada para determinar un PEI y lograr ahorros de energía a partir de acciones combinadas, relacionadas con la eficiencia física y con la eficiencia hidráulica, y potenciar dichos ahorros con las acciones de reducción de fugas y sectorización de la red de distribución.

Finalmente, se presenta un análisis de los casos de ciudades de nuestro país que han realizado un PEI y que actualmente están en proceso de implementación.

Este capítulo se complementa con la información de los libros *Rehabilitación de Pozos y Eficiencia Energética*, *Uso Eficiente y Ahorro de la Energía*, del MAPAS.

4.1. LA EVOLUCIÓN DE LOS ENFOQUES DE EFICIENCIA FÍSICA, HIDRÁULICA Y ENERGÉTICA

Recordando las expresiones para determinar la potencia que demandará un equipo de bombeo y el costo anual que se paga por la operación del mismo tenemos:

$$P_{bomba} = \frac{9.81Q_{bomba}H_t}{\eta_b} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$$Costo_{BombaAnual} = \frac{Costo}{kW} (Potencia) (\#horasanuales)$$

Ecuación 4.2

donde:

- P_{bomba} = Potencia de la bomba (W)
- Q_{bomba} = gasto de la bomba (m³/s)
- H_t = carga dinámica total (m)
- η_b = eficiencia entre la potencia entregada al fluido y la potencia del motor
- $Costo$ = costo del kilowatt-hora; en este caso la potencia está dada en kilowatt-hora

Partiendo de estas expresiones y de las condiciones de las instalaciones electromecánicas en los sistemas de agua, tenemos que cuando los equipos se desgastan por un uso y por condiciones operativas inadecuadas, la eficiencia

Ilustración 4.1 Equipo de bombeo con eficiencia baja



η_b , disminuye y por tanto, para considerar la mismas cantidades de gasto y carga, la potencia aumenta, lo que representa un consumo de energía (kWh) mayor. En la Ilustración 4.1 se muestra un equipo de bombeo con altas deficiencias en su operación (el desgaste de sus impulsores, el deterioro del cableado eléctrico y la falta de mantenimiento disminuyen la eficiencia del equipo).

Además, las tarifas contratadas por la venta de energía eléctrica y el número de horas anuales de operación de los equipos de que se dispone en los sistemas de agua son factores determinantes en los costos que el organismo operador tiene que cubrir cada año.

Ahora, partiendo de la carga total de bombeo (H_t) y del caudal a bombear (Q_b), tenemos que la carga dinámica (H_t) depende de cada sistema hidráulico y de las condiciones particulares,

como la profundidad del acuífero, desniveles topográficos, capacidad de conducción de la tubería, deterioro y envejecimiento de la misma, así como las condiciones cambiantes de nivel dinámico o carga de presión en la descarga (cuando se inyecta directamente a la red de distribución). Todo esto hace que se incremente la carga en las bombas y, en consecuencia, que disminuya el gasto bombeado; es decir, que la operación del equipo de bombeo sea menos eficiente y, por ende, el consumo de energía eléctrica sea mayor respecto al de diseño.

Según estudios del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 1999), se estima que existen en México alrededor de 150 000 kilómetros de tubería de agua potable con edades superiores a los 30 años, y está comprobado que estas tuberías aumentan significativamente su coeficiente de fricción en sus años de servicio.

Aunado a lo anterior, si el diseño del sistema hidráulico es deficiente o si se presentan obstrucciones, como válvulas parcialmente cerradas, aire atrapado, fugas en la tubería, etc., se ten-

drán enormes pérdidas de carga hidráulica, con el consecuente incremento de la carga a vencer para que se pueda suministrar a los usuarios el agua requerida (Ilustración 4.2).

Otro problema ligado a la carga de bombeo es la deficiente distribución de caudales y presiones provocada por la manipulación empírica de válvulas que hacen los operadores de los sistemas de agua, la cual obedece al crecimiento desordenado e irregular de la población y a la falta de capacidades técnicas para la toma de decisiones en la incorporación de nuevas colonias a la red de distribución de agua. Esta situación genera que el servicio se vuelva discontinuo o *tandeado*, lo cual afecta a los usuarios, pues el abastecimiento se vuelve poco confiable y de poca calidad, con el consecuente desgaste operativo y estructural del sistema hidráulico y costos energéticos elevados (Ilustración 4.3).

En México se estima que la continuidad del servicio de agua a los usuarios es del orden de diez horas por día, aunque hay ciudades que pueden presumir de 24 horas.

Ilustración 4.2 Cada fuga en el sistema de distribución de agua provoca una disminución en la carga hidráulica del sistema de bombeo

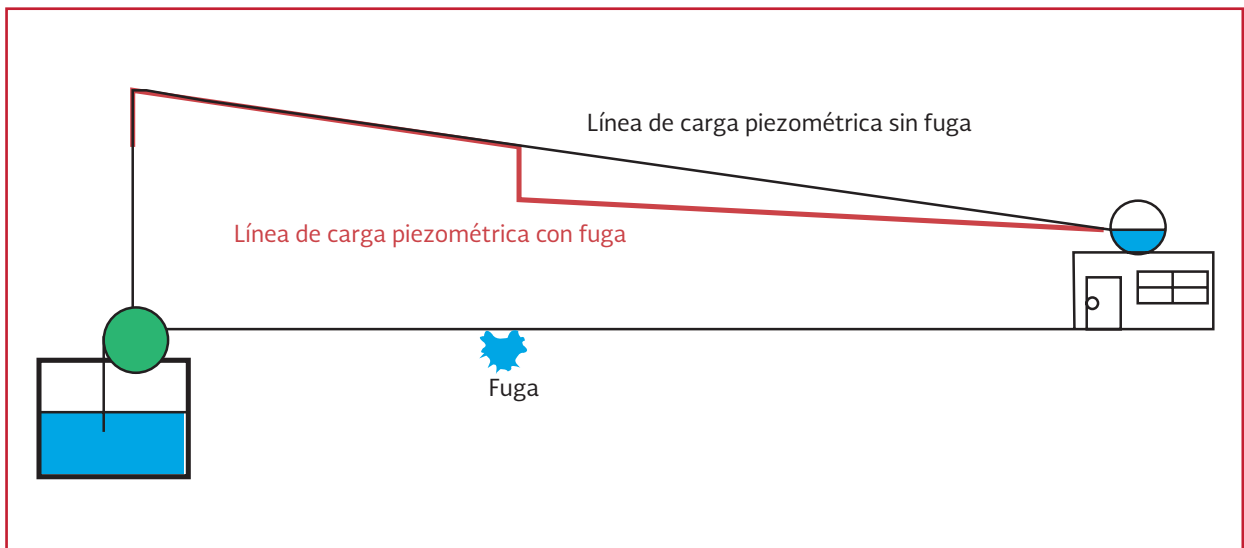
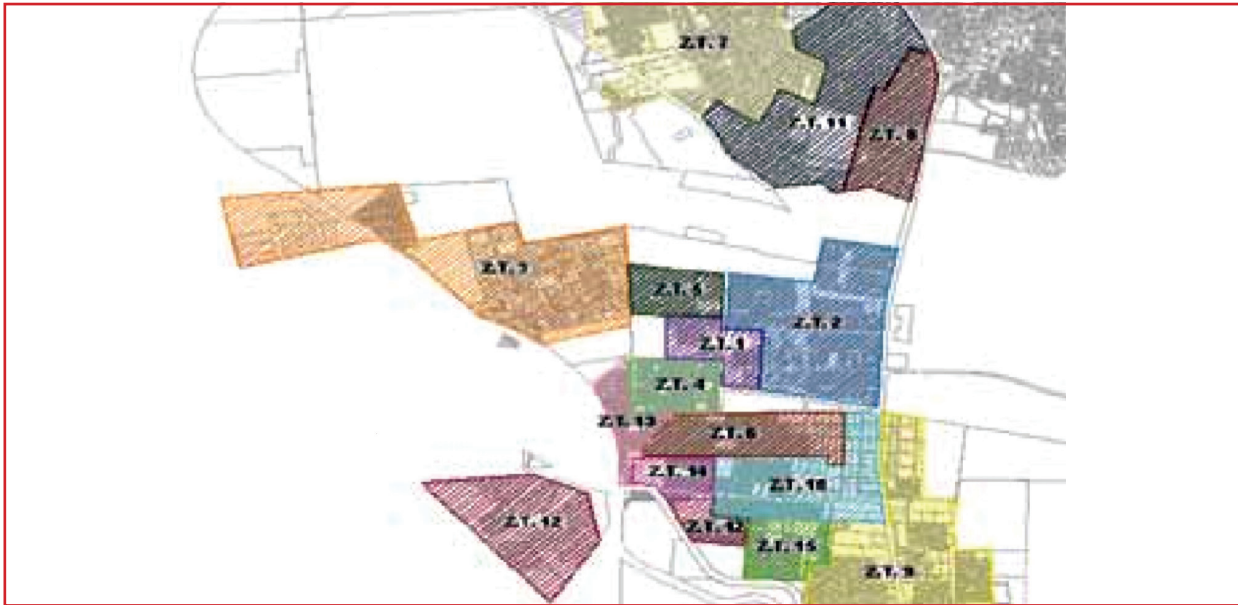


Ilustración 4.3 Esquema de una red de distribución típica en México con servicio de agua discontinuo (las zonas coloreadas indican diferentes horarios de suministro a lo largo del día y de la semana)



El caudal bombeado (Q) incide también en el desperdicio de energía eléctrica. Si después de que el agua es bombeada, se pierde en fugas o es derrochada por los usuarios (sobre todo los de cuota fija), también la energía eléctrica utilizada para su bombeo es desperdiciada y generará un mayor costo operativo para el organismo operador. Las fugas incrementan la demanda de agua potable, lo que se refleja en un mayor caudal bombeado. Nadie utiliza el agua de las fugas, esto significa una pérdida de dinero para el organismo operador y escasez para los pobladores de la localidad. Cabe comentar que en una sola fuga llegan a fluir caudales que van desde los 20 mililitros por segundo (mL/s) en tomas domiciliarias, hasta más de 250 mL/s en tuberías principales y cajas de válvulas (Ilustración 4.4).

En México, las fugas en tomas domiciliarias y en tubería de la red es de 27 por ciento en promedio. También se ha determinado que en las redes de los sistemas de agua potable mexicanos se pierde aproxi-

madamente 32 por ciento del caudal producido en las captaciones. Así, cada litro que se escapa por una fuga en el sistema de abastecimiento equivale a perder el dinero que se necesita para producirla, es decir, el costo de la energía eléctrica para bombearla y del cloro que se le inyecta para desinfectarla.

4.2. ESTRUCTURA DEL PROYECTO DE EFICIENCIA INTEGRAL

Ante la realidad que se presenta en los sistemas de abastecimiento de agua en nuestro país, se plantea la necesidad de solucionar las deficiencias mencionadas en forma integral, revisando las instalaciones de distribución (líneas, tanques, etc.), las instalaciones electromecánicas y las necesidades de abastecimiento a la población (dotación, etcétera).

El procedimiento para elaborar e implementar estos proyectos de eficiencia se divide en 18 pasos, contenidos en las siete etapas siguientes:

Ilustración 4.4 Fugas típicas en redes de agua



1. Trabajos preliminares
2. Evaluación física y generación de datos
3. Evaluación de la disponibilidad de agua
4. Desarrollo del proyecto de eficiencia hidráulica
5. Elaboración del proyecto de eficiencia energética
6. Cálculo de indicadores de evaluación
7. Puesta en marcha de sectores hidráulicos y reducción de pérdidas de agua

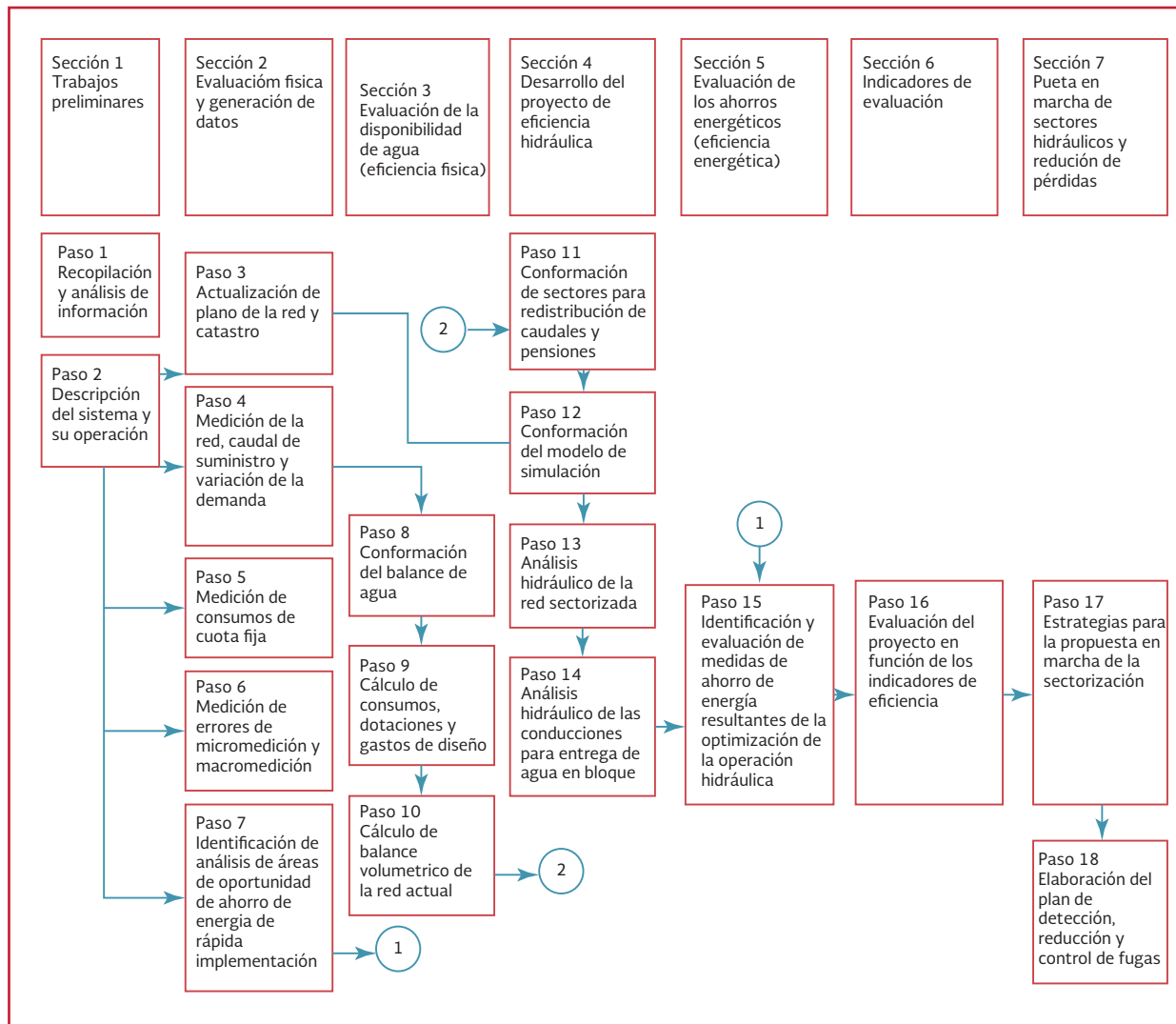
Cada una de estas etapas está indicada en el esquema secuencial del procedimiento mostrado en la Ilustración 4.5. A continuación se describe brevemente cada paso, para así ofrecer una visión general del procedimiento a seguir en la elaboración de un proyecto de eficiencia integral.

4.2.1. TRABAJOS PRELIMINARES

En esta etapa del proyecto de eficiencia se recopila toda la información que tiene el organismo operador y se realiza una inspección del funcionamiento actual del sistema de agua potable (ver sección 1.1 del libro). La información recopilada será el padrón de usuarios, planos de la red, equipos electromecánicos, estadísticas de producción, facturación, fugas y consumos de energía eléctrica.

En esta etapa se requiere entender el funcionamiento actual del sistema de agua potable porque es crucial para lograr un buen proyecto de eficiencia. Es imprescindible conocer al detalle su infraestructura, las características de las captaciones, conducciones, red de distribución,

Ilustración 4.5 Esquema secuencial del proyecto de eficiencia integral



tomas domiciliarias, equipos electromecánicos instalados (características y estado físico) y tanques de regulación. También se debe explorar la situación de los sistemas de macro y micro medición, del control de fugas y de las tarifas vigentes de energía eléctrica.

Toda la información recopilada debe ser validada en campo y verificada por el organismo operador, aun cuando sea obtenida con otras instituciones u otras fuentes de información.

4.2.2. EVALUACIÓN FÍSICA Y GENERACIÓN DE DATOS BÁSICOS

Es común encontrar en los sistemas de agua potable falta de medidores en los puntos de suministro y consumo de agua, ausencia de planos actualizados de la red, falta de curvas características de los equipos de bombeo y datos estadísticos de fugas y errores de medición, entre otros. Por tal motivo, en este libro planteamos datos

básicos, así como hacer un uso óptimo de estadísticas, archivos y conocimientos del personal de los organismos de agua tras haber realizado una campaña de mediciones de campo estratégicas, que complementen la información del organismo operador (Ver sección 1.2).

Las campañas de medición y levantamiento en campo se enfocan en validar la información proporcionada por el organismo operador, en lugar de generar nueva información con extensas campañas de medición (para comprobar exactitud).

En el caso del catastro de la red, se recurre a una combinación de campañas que incluyen entrevistas con el personal de operación del sistema, levantamiento del arreglo de fontanería (pozos, tanques, cruceros, etc.) e inspección del mismo. Se ha encontrado que haciendo lo anterior se logran catastros con un nivel de actualización, cobertura y confiabilidad cercanas al 90 por ciento, lo cual es considerado suficiente para la creación del modelo hidráulico y proponer el proyecto de eficiencia.

Además de las campañas de medición, se realiza el análisis de las características del sistema, población, cobertura, operación, zonas de influencia de tanques y fuentes de abastecimiento, y horarios de tandeo. Finalmente, se realiza una exploración energética, que consiste en conocer los valores de los parámetros en la infraestructura electromecánica, sus condiciones de operación y mantenimiento, el consumo energético histórico, la eficiencia e identificar la forma de operar los sistemas de bombeo.

4.2.3. EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA

Con base en la información estadística obtenida en las etapas anteriores y corregida con los resultados de las campañas de medición, se aplica el balance de agua, con el fin de estimar el nivel de fugas del sistema. En general, este estudio se realiza para un periodo de un año histórico y de acuerdo con los estándares internacionales, adaptados a las condiciones de los sistemas de agua potable mexicanos (ver sección 2.1).

Al conocer el nivel de fugas, se puede entonces determinar la oportunidad de ahorro de agua y energía, y calcular la disponibilidad de agua en el proyecto de eficiencia hidráulica. Después de aplicar el balance de agua, se evalúa el valor de la dotación actual. La experiencia demuestra que en los sistemas de agua potable en nuestro país, las dotaciones en general son elevadas debido al alto porcentaje de fugas existente. Ante esta situación, en los proyectos de eficiencia hidráulica planteados en este libro, se pretende reducir las fugas a un nivel aceptable de 20 por ciento, como medida de conservación del agua de la región y ahorro de energía por bombeo.

Enseguida, se elabora un balance volumétrico en la red de distribución con el fin de evaluar el equilibrio que existe en cada zona de influencia hidráulica entre el gasto disponible en la misma y el consumo demandado por la población. Esta evaluación es la base para elaborar posteriormente el esquema de redistribución de caudales y presiones de la red o

de sectorización, puesto que se identifican las áreas donde la población no tiene suficiente agua, aquellas a las que les sobra agua, la infraestructura desaprovechada y las capacidades de suministro, conducción y regularización del agua disponible, entre otras.

4.2.4. DESARROLLO DEL PROYECTO DE EFICIENCIA HIDRÁULICA

Después de evaluar la distribución de caudales y presiones en la red actual, se efectúa el proyecto de eficiencia hidráulica basado en sectores de distribución en la red (ver secciones 3.1 y 3.2 del libro). El esquema de sectorización de redes tiene ventajas sobre las redes totalmente mallas ya que facilita la asignación de volúmenes de agua a los usuarios; se optimiza el control de fugas, se mejora la operación, se dictaminan mejor las ampliaciones de la red y se logra mayor rentabilidad en el ahorro de agua y energía.

El procedimiento para elaborar el proyecto de eficiencia hidráulica consiste en hacer una redistribución equilibrada de volúmenes de agua en la red en función de la demanda de los usuarios y considerando que se alcanza la dotación de diseño. En este proceso se delimitan sectores hidráulicos, áreas de influencia de tanques y captaciones existentes y se establecen los requerimientos de infraestructura adicional mínima. Un equilibrio en esta redistribución de caudales o un balance positivo significa que cada sector será capaz de cubrir la demanda en cantidad y calidad de servicio a sus usuarios.

Después de definir el esquema de sectorización de la red, se construye un modelo de simulación hidráulica del abastecimiento y distribución del sistema de agua potable. Este modelo deberá estar a escala, georeferenciado y contendrá todos

los tramos de la red, tanques, rebombeos, pozos, conducciones y válvulas.

Actualmente, existen simuladores hidráulicos de redes de agua comerciales, que pueden ser utilizados para esta etapa del proyecto; asimismo, con las herramientas del programa y las mediciones de campo se deberá ajustar el modelo de la red actual antes de proceder al diseño de sectores hidráulicos.

Con el modelo de simulación hidráulica se proyectan, etiquetan y cuantifican los cambios necesarios en la red para su funcionamiento óptimo. Las condiciones de operación y demanda de cada sector resultante de la redistribución de caudales son ingresadas y evaluadas con el modelo. Por un lado, se analizan las condiciones de velocidades y presiones permisibles en la red y por otro se examinan las capacidades de las conducciones para la entrega de agua en bloque y de los tanques de regularización.

Finalmente se plasma en planos, donde se señala la delimitación de sectores propuestos, los detalles de los cambios físicos (cortes, conexiones, instalación de válvulas, etc.) y los diseños de equipos de bombeo.

4.2.5. ELABORACIÓN DEL PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA (PEE)

El proyecto de eficiencia energética se realiza en dos partes: una que se deriva de acciones que aplican solamente en el lado del suministro, denominadas de rápida implementación, y aquellas medidas que consideran también el lado de la demanda, llamadas de mediano plazo.

El proyecto de eficiencia energética de rápida implementación (PEE) consiste en determinar los ahorros de energía con las condiciones actuales de operación del sistema, es decir, sin corregir las deficiencias hidráulicas de la red ni reducir los niveles de fugas existentes. Como acciones de este tipo se consideran: la adecuación o cambio de equipos de bombeo y de motores existentes (de preferencia a equipos de alta eficiencia), el control de presiones mediante variadores de velocidad, utilización de capacitores y de generadores diesel para sustituir suministro de energía en hora punta cuando la tarifa es HM y en el caso del pago ante CFE por menor precio por kWh consumido readecuación de tarifas eléctricas.

Por su parte, el proyecto de eficiencia energética de implementación en el mediano plazo requiere el análisis conjunto de los resultados del proyecto hidráulico, debido a que las condiciones operativas (carga-gasto) cambiarán al redistribuir los caudales, presiones en la red y reducción de las fugas de agua.

Con base en los resultados del proyecto hidráulico, relativo a la operación y redistribución de caudales, se analiza la capacidad de cada sector para aplicar medidas de ahorro de energía, tales como sustitución de equipos de bombeo con las características finales de carga-gasto, la aplicación de variadores de velocidad en sistemas con inyección de agua potable directa a red, paro de equipos utilizando la capacidad de tanques de almacenamiento en hora punta (tarifa HM de CFE) y selección de equipos que pueden quedar en reserva o apagados según la zona de influencia.

Las características de carga, gasto y operación de los equipos de bombeo propuestos en el pro-

yecto de eficiencia hidráulica son evaluadas también para determinar la energía que demandarán, así como el costo de la misma. Estas características son comparadas con las estadísticas de consumo energético del año de estudio, y el resultado de la comparación se considera como un potencial ahorro energético y de agua, derivado de la aplicación del proyecto de eficiencia hidráulica.

4.2.6. CÁLCULO DE INDICADORES DE EVALUACIÓN

Los indicadores son medidas de la eficiencia y eficacia del sistema de agua potable. Aunque existen una gran cantidad de indicadores, en el escenario de la eficiencia física que nos ocupa, se propone el seguimiento mínimo de los siguientes:

- Indicador Energético (IE, kWh/m³)
- Indicador de Costo Unitario de Energía (CUE, \$/kWh)
- Indicador de Eficiencia Física (IEF, por ciento)
- Dotación Promedio por Habitante [L/(hab d)]
- Indicador de Continuidad en el Servicio (ICS)

Es importante determinar estos indicadores permanentemente en los organismos operadores, y especialmente cuando se estén realizando acciones de incremento de eficiencia, puesto que permiten evaluar los avances en el sistema de agua potable y en consecuencia establecer las políticas y programas en este sentido.

La determinación de los indicadores anteriores se describe en el capítulo 5 de este libro.

4.2.7. PUESTA EN MARCHA DE LOS SECTORES HIDRÁULICOS Y REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA

Después de elaborado el proyecto de eficiencia integral, se procede a su implementación (ver apartados 2.2 y 3.2). Este trabajo requiere una estrategia técnica, logística y financiera, por lo que es necesario y efectivo elaborar un programa de ruta crítica de las acciones que haya que implementar. Basándonos en este análisis es posible determinar las interrelaciones o afectaciones en los cambios operacionales del sistema de distribución de agua potable.

Los problemas comunes que surgen durante la puesta en marcha de sectores son: cambios de presiones en la red, alteración temporal de la calidad del agua por cambio de trayectorias del flujo, suspensiones del servicio a los usuarios durante el proceso de construcción, retrasos imprevisibles, problemas de saturación de los sectores por la existencia de cisternas, tinacos en exceso, etc. Sin embargo, todas estas acciones implementadas se traducen en una mejora del servicio a los usuarios, ahorros de agua y ahorros energéticos.

4.3. MEDIDAS DE AHORRO DE ENERGÍA RESULTANTES DE LA OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN HIDRÁULICA

Un programa de reducción de fugas, además de ahorrar agua, reduce las pérdidas de presión y da como resultado ahorros de energía; permite seleccionar, con base en las nuevas condiciones de carga–gasto que se proyecten, y adquirir bombas de mayor eficiencia y, por tanto, menor potencia. Igualmente, si se considera el ahorro por el agua no desperdiciada en las fugas, se contará con más agua disponible, por lo que habrá otros beneficios económicos, como el aplazamiento de inversiones para una nueva fuente de abastecimiento.

Las ineficiencias y defectos en la operación hidráulica también ocasionan excesivo consumo energético; algunos de estos problemas y sus consecuencias se describen en la Tabla 4.1.

Con base en esto, una etapa importante dentro de la metodología del proyecto de eficiencia integral

Tabla 4.1 Problemas operativos típicos y sus consecuencias en el consumo energético

Problema o defecto operativo	Consecuencia hidráulica	Consecuencia energética
Desbalance volumétrico en la asignación de caudales por zonas	Suministro por tandeo, mayores pérdidas de agua en redes por sobrepresiones y deterioro de la infraestructura	Mayor número de horas de operación de equipos de bombeo por agua suministrada, mayores pérdidas energéticas por variaciones de mayor presión en la tubería
Falta de dispositivos de control de presión	Excesivas pérdidas de agua por elevadas presiones, mayores pérdidas de agua por fugas a presión	Gastos mayores de energía por mayor carga de bombeo, además de variaciones en el punto óptimo de eficiencia de equipos
Carencia de tanques de regulación y desaprovechamiento de los existentes	Mayores pérdidas de agua por fugas con presiones altas, mayor deterioro de la infraestructura por regulación de gastos por válvulas en las redes	Mayor potencia en sistemas de bombeo en periodos pico de demanda (puntos de operación fuera de máxima eficiencia)

consiste en determinar y cuantificar adecuadamente los ahorros de energía resultantes de los cambios en la forma de operar el sistema de distribución (procesos descritos en el capítulo 3). Estas medidas de ahorro de energía resultan de reducir el nivel de pérdidas de agua en las redes y de definir una mejor distribución del agua producida.

Las principales medidas de ahorro que normalmente resultan de este análisis son:

1. Operación fuera de hora punta sin afectar la continuidad del servicio
2. Operación de los sistemas de bombeo durante el número de horas estrictamente necesario
3. Aprovechamiento óptimo de variadores de frecuencia
4. Ahorro de energía por cambios en la carga y gasto originales al instalar equipos de bombeo operando a máxima eficiencia

4.3.1. OPERACIÓN DE EQUIPOS DE BOMBEO FUERA DE HORA PUNTA

Para evaluar la posibilidad de suspender el bombeo en horas punta (tarifa HM de CFE), deberá considerarse lo siguiente:

Antes de proyectar paros de equipos que impliquen una disminución del volumen diario disponible para la zona y que agravan el servicio discontinuo, conviene pensar en cambios que permitan un incremento del caudal disponible en la zona hasta lograr el servicio continuo.

Además, los equipos en cuestión deberán abastecer el sector mediante un tanque regulador. El

paro en hora punta se podrá realizar siempre y cuando se cuente con una reserva de agua en el tanque que cubra la demanda durante las horas punta (Ilustración 4.6).

Cuando se realizan paros de equipos, el volumen de agua que no se suministra durante las horas de paro debe ser cubierto durante las horas base, de tal forma que el volumen de agua diario entregado a la población permanezca constante (Ilustración 4.7).

El tanque regulador debe contar con capacidad suficiente. Se utilizará la metodología desarrollada en el apartado 3.2.1.3, para revisar que el tanque regulador tenga la capacidad suficiente para las condiciones de operación con el paro en hora punta.

El gasto extra (Q_{extra}) en horario base para compensar el paro en hora punta se podrá calcular de dos maneras:

- Horas de bombeo fijas y gasto por definir. Se utilizará la Ecuación 4.3 para calcular el gasto extra a bombear durante las horas base

$$Q_{extra} = \left(1 - \frac{24horas}{horasbase}\right) Q_{máximodiario}$$

Ecuación 4.3

- Gasto disponible fijo y horas de bombeo por definir. Si una fuente establecida, como un pozo disponible o en reserva, se utilizase para cubrir el gasto extra, el horario y el tiempo de bombeo deben definirse utilizando la Ecuación 4.4

$$hr_{bombeo} = \left(1 - \frac{Q_{disponible}}{Q_{extra}}\right) hr_{base} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Ilustración 4.7 Volumen demandado en un día, a) con suministro continuo y b) con paro en hora punta

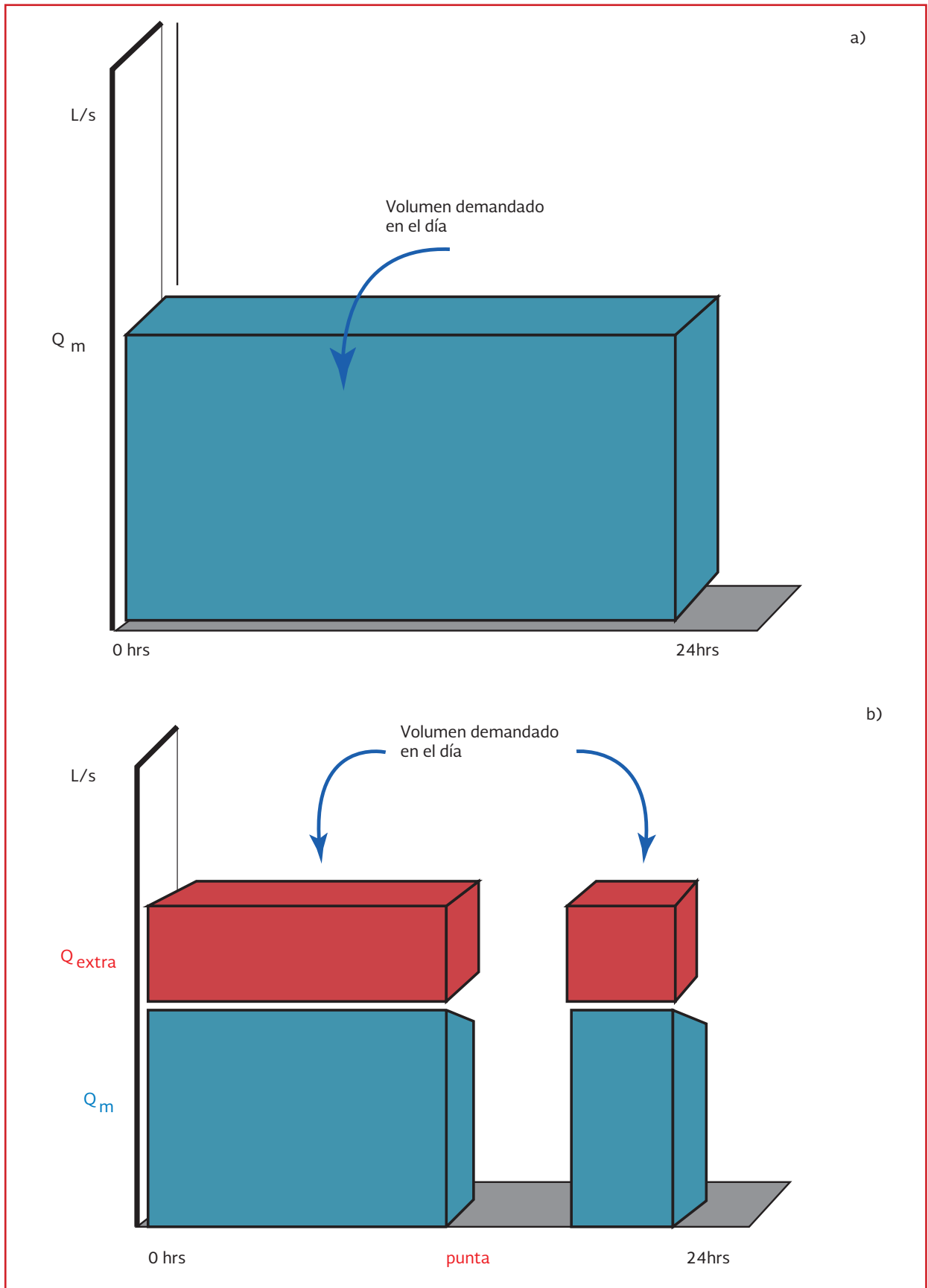


Tabla 4.2 Ejemplo del formato para el cálculo de capacidad de regulación requerida con paro en hora punta

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Horas	Suministro %	Demanda horaria %	Diferencias	Acumulado %
0-1	120	61	59.00	39
1-2	120	62	58.00	77
2-3	120	60	60.00	117
3-4	120	57	63.00	160
4-5	120	57	63.00	203
5-6	120	56	64.00	247
6-7	120	78	42.00	269
7-8	120	138	-18.00	231
8-9	120	152	-32.00	179
9-10	120	155	-35.00	124
10-11	120	141	-21.00	83
11-12	120	138	-18.00	45
12-13	120	138	-18.00	7
13-14	120	137	-17.00	-30
14-15	120	136	-16.00	-66
15-16	120	141	-21.00	-107
16-17	120	114	6.00	-121
17-18	120	106	14.00	-127
18-19	-	102	-102.00	-129
19-20	-	91	-91.00	-120
20-21	-	79	-79.00	-99
21-22	-	73	-73.00	-72
22-23	120	71	49.00	-43
23-24	120	57	63.00	0
Total	2400	2400	-	-

Tabla 4.3 Formato para el cálculo de la demanda facturable promedio actual

Equipo	Consumo de energía actual (kWh)			Demanda máxima actual (kW)		
	Punta	Intermedia	Base	Punta	Intermedia	Base
1						
2						
...						
...						
Promedio	EE_p	EE_i	EE_B	DEM_p	DEM_i	DEM_B

$$P_{ep} = g \frac{Q_p H_p}{\eta_p} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

donde:

- P_{ep} = potencia eléctrica del sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta (kW)
- Q_p = gasto especificado para el sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta (m³/s)
- H_p = carga dinámica total para el sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta (m)
- g = gravedad (9.81 m/s²)
- η_p = eficiencia electromecánica para el sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta

Calcular la demanda facturable promedio actual como:

$$DF = DEM_p + FRI \max(DEM_I - DEM_p, 0) + FRB[\max(DEM_B - DEM_{p,I}, 0)]$$

Ecuación 4.6

donde:

- DF = demanda facturable promedio actual
- DEM_p = demanda máxima en punta promedio
- DEM_I = demanda máxima en intermedio promedio
- DEM_B = demanda máxima en base promedio
- $DEM_{p,I}$ = demanda máxima en punta e intermedio promedio
- FRI = factor de reducción en horario intermedio aplicable a la región tarifaria donde se encuentre el servicio

FRB = factor de reducción en horario de base, aplicable a la región tarifaria donde se encuentre el servicio

Esta será la potencia que se reducirá en hora punta, y el ahorro en potencia se calcula con la diferencia entre la potencia actual y la que se reducirá en hora punta con la Ecuación 4.7

$$\Delta P_{hp} = DP_{pa} - P_{ep} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

donde:

- ΔP_{hp} = potencia eléctrica a ahorrar en hora punta (kW)
- DP_{pa} = demanda actual de potencia en hora punta (kW)
- P_{ep} = potencia eléctrica del sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta (kW)

Cabe mencionar que en caso de poder parar todo el periodo en hora punta, el factor P_{ep} se convierte en cero, por lo que el ahorro en potencia punta será equivalente a la demanda máxima en hora punta actual

3. Cálculo de la demanda facturable y consumo a ahorrar en hora punta. Una vez calculada la potencia propuesta a reducir en hora punta, se calcula la reducción en demanda facturable con la Ecuación 4.8

$$DF_{fe} = (DF_{fa} - \Delta P_{hp}) FRI \quad \text{Ecuación 4.8}$$

donde:

- DF_{fe} = demanda facturable esperada (kW)
- DF_{fa} = demanda facturable actual (kW)

FRI = factor de reducción en horario intermedio aplicable en la región tarifaria donde se encuentre el servicio

ΔPph_p = potencia eléctrica a ahorrar en hora punta (kW)

CDF = costo unitario de la demanda facturable, según la región tarifaria

EE_{pe} = energía consumida en punta esperada (kWh/año)

EE_{pa} = energía consumida en punta actual (kWh/año)

CEP = costo unitario de la energía de punta, según la región tarifaria

La energía consumida en punta esperada (EE_{pe} , en kWh) se calcula con la Ecuación 4.9

$$EE_{pe} = EE_{pa} - \Delta Pph_p(hr_{tp}) \quad \text{Ecuación 4.9}$$

donde:

EE_{pe} = energía consumida en punta esperada (kWh/año)

EE_{pa} = energía consumida en punta actual (kWh/año)

hr_{tp} = horas anuales que dura el horario punta, según la región (horas punta/año)

ΔPph_p = potencia eléctrica a ahorrar en hora punta (kW)

- Determinar los ahorros económicos a obtener con la medida
Calcular el importe de la facturación esperada en hora punta mediante la Ecuación 4.10

$$\$Fe = (DF_{fe} - DF_{fa})CDF + (EE_{pa} - EE_{pe})CEP$$

Ecuación 4.10

donde:

$\$Fe$ = importe de la facturación actual esperada con la nueva hora punta

DF_{fe} = demanda facturable esperada calculada en el paso anterior (kW)

DF_{fa} = demanda facturable actual (kW)

4.3.2. CAMBIO DE CONDICIONES DE CARGA Y GASTO EN EQUIPOS EXISTENTES

Esta medida de ahorro de energía eléctrica se calcula por cambio en las condiciones de operación de los equipos de bombeo respecto a las actuales, antes del proyecto, y las propuestas finales. Estos ahorros pueden ser positivos, pero también pueden ser negativos, en caso de que dichas condiciones propuestas incrementen las cargas o los gastos de operación.

A continuación se presenta el procedimiento de cálculo:

- Se definen los sectores y sistemas de bombeo que tendrán cambios y se especifican las condiciones de operación actuales. Se sugiere utilizar el formato de la Tabla 4.4. Procedimiento:
 - Se registra el sector hidráulico donde se propone operar el equipo que sufrirá cambios en sus condiciones de operación
 - Se especifica el tipo de operación para cada sector, el cual puede ser regulado o de suministro directo a la red
 - Se especifica la forma actual de operar de los sectores en los que se en-

- cuentren los equipos que sufrirán cambios
- d. Se especifica la forma propuesta de operar dichos sectores y los equipos de bombeo involucrados
- e. Se registra el número actual de horas anuales de operación
- f. Se indican las condiciones actuales

- de gasto de los equipos de bombeo
- g. Se indican las condiciones de carga actuales de los equipos de bombeo
- 2. Se especifican las condiciones de operación propuestas y se calculan las diferencias con base en el consumo y costo energético; se sugiere utilizar la Tabla 4.4 y la Tabla 4.5

Tabla 4.4 Formato para especificar equipos que tendrán cambios en la carga y el gasto

Identificación de las zonas y equipos de bombeo				Descripción de la operación y sus cambios		Condición actual			
1	2	Sistema de bombeo	Num. de equipo	3	4	5	6	7	
Identificación del sector proyecto	Operación del sector			Operación actual	Operación propuesta	Horas anuales de operación actuales	Gasto (m³/s)	Carga (m)	
SH-1	Centro regulado	a	1	Se describe cómo opera actualmente cada sector	Se describe cómo se propone operar cada sector en la nueva opción de optimización hidráulica				
			2						
SH-2 SH-N	Centro directo	b	1						
			c			1			
						1			
						1			
						1			
SH-n	n	n	1						

Tabla 4.5 Formato para el cálculo de ahorros energéticos por cambio en condiciones de operación

Identificación de las zonas y equipos de bombeo				Condición propuesta		Variación en el consumo y facturación energética				
6	7	Sistema de bombeo	Num. de equipo	8	9	10	11	12	13	14
Identificación del sector proyecto	Operación del sector			Gasto propuesto (L/s)	Carga propuesta (m)	Horas anuales de operación	Eficiencia electromecánica propuesta	Ahorro en potencia eléctrica ΔP_{ec} (kW)	Ahorro en consumo de energía $\Delta \$C_{ec}$ (kWh/año)	Ahorro en facturación energética ΔF_{ec} (\$/año)
SH-1	Centro regulado	a	1	Q_p	H_p					
			2							
SH-2 SH-N	Centro directo	b	1							
			c	1						
				1						
				1						
				1						
SH-n	n	n	1							

Explicación del procedimiento:

- Se especifican las condiciones de caudal propuestas (Q_p)
- Se especifican las condiciones de carga propuestas (H_p)
- Se especifican las horas anuales de operación que tendrá el equipo de bombeo hr_{aop}
- Se especifica la eficiencia electromecánica para el nuevo equipo propuesto η_{em}
- Se calcula el ahorro (o variación) en potencia eléctrica por cambios en condiciones de operación con la Ecuación 4.11

$$\Delta Pec = (Q_p H_p - Q_a H_a) \frac{9.81}{\eta_{em}} \quad \text{Ecuación 4.11}$$

- Se calcula el ahorro por consumo energético anual por cambios $A\$C_{ec}$ con la Ecuación 4.12

$$A\$C_{ec} = \Delta Pec (h_{raop}) \quad \text{Ecuación 4.12}$$

- Se calcula el ahorro en facturación energética por cambios ΔFE_c :

$$\Delta FE_c = EE_{qe} (CUE) \quad \text{Ecuación 4.13}$$

donde:

- ΔFE_c = facturación eléctrica ahorrada por equipo (\$/año)
- EE_{eq} = energía eléctrica ahorrada (por equipo)(kWh/año)
- CUE = indicador de costo energético unitario específico para el sistema en estudio (\$/kWh)

Sumando el total de equipos que cambian sus condiciones y reducen su tiempo de operación:

$$\Delta FE_t = \sum_{i=1}^{n_x} (\Delta FE_1 + \dots + \Delta FE_n)$$

Ecuación 4.14

donde:

- ΔFE_t = facturación eléctrica ahorrada total con todos los equipos donde aplica esta medida (kWh/año)
- ΔFE_1 = facturación eléctrica ahorrada en el equipo 1 (kWh/año)
- ΔFE_n = facturación eléctrica ahorrada en el equipo n (kWh/año)
- n_x = número total de equipos donde aplica esta medida

4.3.3. APLICACIÓN DE VELOCIDAD VARIABLE EN EQUIPOS QUE INYECTAN DIRECTO A LA RED

Cuando la solución hidráulica para suministrar agua a una determinada zona implica no usar un tanque regulador por: a) no existir dicho tanque, b) no poder modificar la infraestructura de conducciones, c) no convenir a la mejor forma de operación para dicha zona, y se tiene que suministrar agua directamente a la red, se puede utilizar las herramientas descritas en el capítulo 3 de este libro, fundamentalmente el modelo de simulación hidráulica de la red para evaluar y determinar los parámetros de operación y para la aplicación de variadores de velocidad.

Esta medida puede o no coincidir con los sistemas que ya se identificaron en los proyectos de ahorro de rápida implementación presentados en el libro *Eficiencia Energética, Uso Eficiente y Ahorro de la Energía* del MAPAS. Sin embargo, el cálculo de ahorros potenciales es diferente al explicado en dicho libro para sistemas de bom-

Tabla 4.6 Formato para identificar sectores de operación donde es viable el variador de velocidad

Identificación				Análisis hidráulico			Operación
Sector proyecto	Sub sector	Pozo		Gasto máx. propuesto (L/s)	Carga a gasto máx (m)	Setpoint carga (m)	
		Identificación	Núm.				
							Directo a red SH-6 con variador de carga constante
							Directo a red SH-6b con variador de carga constante
							Directo a red SH-6c con variador de carga constante
							Directo a red SH-6d con variador de carga constante

beo en operación actual dado que, en este caso, se trata de una situación operacional hipotética optimizada. El cálculo en este caso se realiza de la forma siguiente:

1. Se identifican los sectores que operan con suministro directo a red y en los que es viable un variador de velocidad, y se especifican las condiciones de operación, carga y gasto máximos, así como la presión de control constante validada por el modelo de simulación hidráulica. El formato a usar es el que se muestra en la Tabla 4.6
2. Se calculan los valores y tiempos de operación a gasto medio de la forma siguiente:

El gasto máximo (Q_{max}) es el propuesto; el gasto medio (Q_{med}) y mínimo (Q_{min}) se calculan con los factores de variación máxima horaria y diaria en función del

gasto máximo

$$Q_{med} = Q_{max} / 2.17, \text{ en L/s}$$

$$Q_{min} = Q_{max} / 3.86, \text{ en L/s}$$

Los tiempos de operación se estiman con base en la curva de demanda presentada en la Ilustración 3.11:

$$\text{Horas al día en } Q_{max} = 8 \text{ horas}$$

$$\text{Horas al día en } Q_{med} = 5 \text{ horas}$$

$$\text{Horas al día en } Q_{min} = 11 \text{ horas}$$

El formato a usar con los valores indicados en un ejemplo es el mostrado en la Tabla 4.7

3. Se calcula el consumo de energía anual operando sin variador de velocidad: Las cargas estimadas de operación para cada Q (máx, med y mín) y sus respectivas eficiencias electromecánicas se estiman de acuerdo con el comportamiento de una curva de operación típica. La potencia eléctrica P_e (kW) para cada

Tabla 4.7 Formato de requerimientos de sectores

Identificación				Análisis hidráulico			Requerimientos								
Sector proyecto	Sub sector	Pozo		Gasto máx. propuesto	Carga a gasto máx	carga	Q requerido			Operación					
		Identificación	Núm.				L/s	m	m	Mín.	Medio	Máx.	Mín.	Medio	Máx.
										L/s			h/d		
SH-6b	N3	Factor I	56	27	125	130	7	12.4	27	11	5	8			
		Factor II	57	12	125	130	3.1	5.5	12	11	5	8			

periodo se calcula con el gasto, carga y eficiencia electromecánica, mediante la Ecuación 4.15.

$$P_e = \frac{9.81(QH)}{\eta_{em}} \quad \text{Ecuación 4.15}$$

donde:

- P_e = potencia eléctrica que se demandará en el periodo (kW)
- Q = gasto esperado para el periodo (m^3/s)
- H = carga hidráulica de bombeo para el gasto esperado del periodo (m)
- η_{em} = eficiencia electromecánica en el punto de operación del periodo

La energía anual consumida por periodo (kWh/año) se calcula como el producto de la potencia eléctrica que se demandará en ese periodo, multiplicada por el número de horas de operación al día del periodo correspondiente y por el número de días de operación al año, utilizando la Ecua-

ción 4.16.

$$EE = P_e(\text{numhoras})\left(\frac{\text{numdías}}{\text{año}}\right)$$

Ecuación 4.16

donde:

- EE = energía que se consumirá en el periodo correspondiente (kWh/día)
- P_e = potencia eléctrica que se demandará en el periodo (kW)
- numhoras = número de horas que operará el equipo en dicho periodo
- $\text{numdías}/\text{año}$ = número de días al año que opera el equipo

En la Tabla 4.8 se presenta un ejemplo del cálculo de la energía anual consumida en cada uno de los periodos (punta, medio y base); en ella están indicados, siguiendo la metodología, los datos de caudal, carga, eficiencia electromecánica, número de horas de operación al día,

Tabla 4.8 Ejemplo de cálculo de energía anual consumida en hora punta, media y base

Identificación del equipo	Periodo pico (Gasto máximo)					
	$Q_{m\acute{a}x}$ Propuesto	Carga a $Q_{m\acute{a}x}$	η_{em} a $Q_{m\acute{a}x}$	Operación	Potencia eléctrica	Energía
Pozo factor 1	m^3/s	m		h/d	kW	kWh/año
	0.027	125	62.30%	8	53.14	155 181
Identificación del equipo	Periodo medio (Gasto medio)					
	Q_{med} Propuesto	Carga a Q_{med}	η_{em} a Q_{med}	Operación	Potencia eléctrica	Energía
Pozo factor 1	m^3/s	m		h/d	kW	kWh/año
	0.0124	164.4	50.30%	5	40.14	73 249
Identificación del equipo	Periodo valle (Gasto mínimo)					
	$Q_{m\acute{i}n}$ Propuesto	Carga a $Q_{m\acute{i}n}$	η_{em} a $Q_{m\acute{i}n}$	Operación	Potencia eléctrica	Energía
Pozo factor 1	m^3/s	m		h/d	kW	kWh/año
	0.007	171.7	35.50%	11	33.19	133 252

potencia eléctrica estimada y energía eléctrica consumida por periodo.

Siguiendo el mismo ejemplo, en la Tabla 4.9 se presenta el cálculo de la energía anual consumida en cada uno de los periodos (pico, medio y valle), en la que se indica, siguiendo la metodología, los datos de caudal, carga, eficiencia electromecánica, número de horas de operación al día, potencia eléctrica estimada y energía eléctrica consumida por periodo.

De manera similar al caso sin variador de velocidad, la energía total anual consumida por el equipo se calcula como la suma de la energía consumida al año en cada uno de los periodos, como se ilustra a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Energía anual consumida con variador} &= \text{Energía consumida en periodo punta} + \text{Energía consumida en periodo intermedio} + \text{Energía consumida en periodo valle} \\ &= 155\,181 \text{ kWh/año} + 57\,572 \text{ kWh/año} + 100\,890 \text{ kWh/año} = 313\,643 \text{ kWh/año} \end{aligned}$$

El ahorro de energía se calcula restando el consumo de energía anual con variador y sin variador por simple diferencia, esto es:

$$\begin{aligned} \text{Energía anual ahorrada} &= \text{Energía anual consumida sin variador} - \text{Energía anual consumida con variador} \\ &= 361\,682 \text{ kWh/año} - 313\,643 \text{ kWh/año} = 48\,038 \text{ kWh/año} \end{aligned}$$

4.3.4. PARO DEFINITIVO DE EQUIPOS COMO RESULTADO DE UN PROGRAMA DE REDUCCIÓN DE FUGAS

Si como resultado del proyecto de eficiencia hidráulica se propone una reducción de fugas, la recuperación de caudales generada se representa como adecuación de equipos (propuestos), paro de equipos o reducción de horas de operación de los equipos. El ahorro de energía resultante de esta medida se calcula de la siguiente forma:

Tabla 4.9 Ejemplo de cálculo de energía anual consumida en diferentes periodos

Identificación del equipo	Periodo pico (Gasto máximo)					
	$Q_{m\acute{a}x}$ Propuesto	Carga a $Q_{m\acute{a}x}$	η_{em} a $Q_{m\acute{a}x}$	Operación	Potencia eléctrica	Energía
Pozo factor 1	m ³ /s	m		h/d	kW	kWh/año
	0.027	125	62.30%	8	53.14	155 181
Identificación del equipo	Periodo medio (Gasto medio)					
	Q_{med} Propuesto	Carga controlada	η_{em} a Q_{med}	Operación	Potencia eléctrica	Energía
Pozo factor 1	m ³ /s	m		h/d	kW	kWh/año
	0.0124	130	50.30%	5	31.55	57 572
Identificación del equipo	Periodo valle (Gasto mínimo)					
	$Q_{m\acute{i}n}$ Propuesto	Carga controlada	η_{em} a $Q_{m\acute{i}n}$	Operación	Potencia eléctrica	Energía
Pozo factor 1	m ³ /s	m		h/d	kW	kWh/año
	0.007	130	35.50%	11	25.13	100 890

1. Se concentran en una tabla los siguientes datos de los equipos que quedarán en reserva:

- a. Potencia eléctrica demandada actual del equipo propuesto a parar totalmente (P_{ept}) (kW), resultante de la estadística de facturación actual o de la medición de potencia eléctrica en campo si no se cuenta con dicha estadística
- b. Consumo de energía actual resultante de la estadística de facturación actual (C_{ea}) (kWh/año)
- c. Horas de operación anuales para el sistema de bombeo propuesto a parar en forma definitiva (hr_{op}) (horas/año)

2. Una vez determinada la potencia eléctrica, se calcula el ahorro energético por paro definitivo del equipo propuesto (ΔEE_{pt}) en kWh/año con las horas de operación anuales con la Ecuación 4.17

$$\Delta EE_{pt} = P_{prop} hr_{op} \quad \text{Ecuación 4.17}$$

donde:

- ΔEE_{pt} = ahorro energético por paro definitivo del equipo (kWh/año)
- P_{prop} = potencia eléctrica del sistema de bombeo propuesto a parar definitivamente (kW)
- hr_{op} = horas de operación anuales del equipo propuesto (hr/año)

3. Una vez determinado el ahorro energético, se calcula el ahorro en facturación energética por paro definitivo del equipo,

ΔFE_{pt} con la Ecuación 4.18

$$\Delta FE_{pt} = \Delta EE_{pt} (CUE) \quad \text{Ecuación 4.18}$$

donde:

- ΔFE_{pt} = facturación eléctrica ahorrada por paro definitivo de equipo (\$/año)
- ΔEE_{pt} = energía eléctrica ahorrada por paro definitivo de equipo (kWh/año)
- CUE = indicador de costo energético unitario específico para el sistema en estudio (\$/kWh)

Este valor se compara con la estadística de facturación actual para asegurar su consistencia. Por el total de equipos que salen de servicio, el ahorro total de energía se calcula con la Ecuación 4.19

$$\Delta EE_t = \sum_1^{n_y} (\Delta EE_1 + \dots + \Delta EE_n) \quad \text{Ecuación 4.19}$$

donde:

- ΔEE_t = energía ahorrada total con todos los equipos donde aplica esta medida (kWh/año)
- ΔEE_1 = energía eléctrica ahorrada en el equipo 1 (kWh/año)
- ΔEE_n = energía eléctrica ahorrada en el equipo n (kWh/año)
- n_y = número total de equipos donde aplica esta medida

4. Se realiza el cálculo de ahorros económicos anuales que se obtendrán con la im-

plantación de la medida con la Ecuación 4.20

$$A\$_t = AEE_t(CUE) \quad \text{Ecuación 4.20}$$

donde:

$A\$_t$	= ahorro económico anual que se obtendrá con esta medida (\$/año)
AEE_t	= energía ahorrada total con todos los equipos donde aplica esta medida (kWh/año)
CUE	= costo unitario de la energía específico para el sistema de agua potable en estudio (\$/kWh)

Cabe reiterar que, como en el caso de los equipos de bombeo que salen de operación, las potencias y consumos toman el valor de cero y los ahorros son equivalentes a las potencias, consumos y facturaciones actuales de dichos equipos.

4.3.5. CUANTIFICACIÓN DE AHORROS DE ENERGÍA TOTALES

Una vez calculados todos los ahorros, se procede a resumir los ahorros de energía globales, distinguiendo las medidas convencionales o de rápida implementación (Las cuales se presentan en el libro *Eficiencia Energética, Uso Eficiente y Ahorro de la Energía* del MAPAS), de

las medidas resultantes de la operación hidráulica, calculadas en la presente sección.

El formato sugerido para concentrar y mostrar los potenciales de ahorro de energía se presenta en la Tabla 4.10.

Los principales datos a llenar son los siguientes:

1. Ahorros de energía y facturación anuales para cada medida de ahorro que resulta de la sumatoria de ahorros tanto energéticos como económicos de todos los equipos o sistemas de bombeo donde aplica cada medida
2. Porcentaje de ahorro por tipo de medida a efectuar. Se calcula dividiendo el ahorro de cada medida entre el consumo y costo energético anual actual
3. Se calcula el costo de inversión total para cada medida
4. Se estima el tiempo simple de retorno de la inversión dividiendo el valor de la inversión entre el ahorro económico anual (años)
5. Los totales de ahorro y porcentaje se obtienen sumando todas las medidas; se puede realizar una sumatoria por tipo de medidas para distinguir el ahorro de energía potencializado con medidas de ahorro de energía resultantes de la operación hidráulica

Tabla 4.10 Formato de resumen de ahorros de energía derivados del proyecto integral

Medida de ahorro		Ahorro (1)		(2)	(3)	(4)
		Energía	Facturación	Ahorro	Inversión	Pay-Back
Tipo	Descripción	kW-h/año	\$/año	%	\$	años
Medidas convencionales	Optimización de eficiencia electromecánica vía sustitución de equipos de bombeo					
	Optimización del factor de potencia					
	Adecuación de tarifas					
	Ahorro de energía por optimización de las conducciones					
	Otras medidas					
	Total medidas convencionales					
Optimización de la pperación hidráulica	Paro de equipos en hora punta					
	Equipos fuera de operación					
	Equipos que modifican su operación					
	Instalación de variadores de velocidad					
	Otras medidas					
	Total medidas					
Totales (5)						

5

INDICADORES DE EFICIENCIA

Los indicadores son medidas de la eficiencia y eficacia de los abastecimientos de agua con respecto a determinados aspectos de la actividad del abastecimiento y del comportamiento del sistema. La eficiencia es la medida de hasta qué punto los recursos del abastecimiento se utilizan de manera óptima para dar el servicio, mientras que la eficacia es la medida de en qué grado se han cumplido los objetivos marcados.

Un indicador de eficiencia es un número porcentual o absoluto que determina o indica el grado de avance de un organismo operador y es un cociente que se obtiene de la información que se maneja o se registra por alguna actividad. Cada indicador expresa el nivel de actividad en una determinada área durante un determinado periodo de tiempo; permite una comparación clara con los objetivos definidos, lo cual simplifica un análisis de por sí complejo.

En los abastecimientos de agua potable, la evaluación y el uso de indicadores de eficiencia implica las ventajas siguientes:

- Permiten tener una respuesta más rápida y de mayor calidad de la operación del sistema de abastecimiento; al mismo tiempo, los indicadores permiten moni-

torear más fácilmente los resultados del funcionamiento

- Facilitan información clave sobre el abastecimiento, lo cual fortalece el enfoque proactivo de la gestión, a diferencia del enfoque reactivo más tradicional, que normalmente confía en funcionamientos aparentes y erróneos del sistema
- Crean un incentivo para adoptar medidas correctivas, como la reubicación de recursos humanos para mejorar la productividad y modernizar las rutinas y procedimientos tradicionales
- Cuando los organismos operadores están interesados en implantar una gestión total de la calidad, los indicadores pueden tener un papel relevante, como una manera de enfatizar calidad y eficiencia globales en la organización
- Permiten a los organismos operadores implementar procedimientos rutinarios de medida de la eficiencia, ya sea internas para comparar diversas regiones o zonas, o externas para compararse con otros organismos operadores; este tipo de prácticas crea una competencia saludable que, de manera natural, promueve la mejora de los desempeños

- Facilitan las auditorías, ya que constituyen un buen lenguaje técnico para que un equipo de auditores comprenda los trabajos del organismo operador y, por tanto, ellos puedan expresar sus recomendaciones financieras, administrativas y operativas.

Existen varios modelos de indicadores, que han sido estructurados e implantados con diferentes fines (Alegre, 1998). Se mencionan las experiencias de la Oficina de los Servicios de Agua (OFWAT) en Inglaterra y Gales, las iniciativas de la American Water Works Association (AWWA), las del Banco Mundial, las del Banco de Desarrollo Asiático, las de Holanda, el esquema de Portugal, y por último, las de México. En el escenario de la ingeniería de producción y distribución, particularmente en lo que concierne a la eficiencia física, hidráulica y energética de los sistemas de abastecimiento de agua potable, se recomienda utilizar los siguientes indicadores de evaluación, seleccionados con base en la experiencia como los representativos del proceso de eficiencia integral.

$$IE = \frac{\text{Energía total consumida}}{\text{Volumen total de agua producida en captaciones}} = \left[\frac{kWh/año}{m^3/año} \right] \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Meta

No existe un indicador de la media nacional, puesto que depende en gran medida del tipo de captaciones de agua de que se dispongan en el sistema de abastecimiento y de la topografía de la ciudad. Sistemas con suministro de agua solo por bombeo y topografías muy accidentadas tenderán a elevar el indicador; muchas fugas en

5.1. INDICADOR ENERGÉTICO (IE)

Cálculo

Representa la relación exacta de la energía utilizada por los equipos de bombeo en un sistema de agua potable para producir el volumen total del agua suministrada a la red de distribución. Para obtener el volumen de agua producido se aplica el procedimiento especificado en la sección 2.1.2 del presente libro y es expresado en metros cúbicos al año. La energía utilizada se determina utilizando los datos del historial de consumos de energía eléctrica presentada en los recibos de la compañía de electricidad local. Se suman los consumos de todo un año de cada equipo de bombeo del sistema; se expresan en kilowatts-hora.

El Indicador Energético se calcula dividiendo el total de los kilowatts-hora consumidos en un determinado año, entre el total del agua producida en las captaciones del sistema de abastecimiento (Ecuación 5.1).

la red también harán que se incremente el volumen de agua suministrada y, en consecuencia, aumentará la energía utilizada para producir esa cantidad de agua adicional.

Para un organismo operador este indicador irá a la baja cuando se reduzcan los consumos de energía con equipos de bombeo eficientes y en la medida en que se reduzcan las fugas en la red.

5.2. INDICADOR DE COSTO UNITARIO DE ENERGÍA (CUE)

Cálculo

Representa el costo específico por unidad de energía consumida, el cual depende de varios factores: el tipo de tarifa eléctrica contratada, el

$$CUE = \frac{\text{Importe de facturación eléctrica}}{\text{Energía total consumida}} = \left[\frac{(\$/\text{año})}{(\text{kWh}/\text{año})} \right] \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Meta

Al igual que el indicador anterior, no existe un valor medio en el país. Corresponde a cada organismo operador fijar la meta del indicador en función de su infraestructura electromecánica y los costos respectivos.

5.3. INDICADOR DE EFICIENCIA FÍSICA (IEF)

Cálculo

Este indicador permite identificar las pérdidas de agua en la red de distribución de un sistema

$$\text{Eficiencia física}(\%) = \frac{\text{Volumen de agua facturada}}{\text{Volumen de agua producida}} \times 100 \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Meta

En México se ha estimado que un valor de la eficiencia física del 80 por ciento es un valor bastante aceptable y alcanzable; en algunos países

factor de carga (que refleja las horas de operación reales sobre las horas naturales) y factores que inciden en la facturación energética, como la penalización o bonificación por el factor de potencia de la instalación. Este indicador se calcula con base en la estadística de consumo y facturación energética anual recopilada en el organismo operador, así como la producción anual de agua potable (Ecuación 5.2).

de agua potable. Se calcula en porcentaje, dividiendo el valor del volumen de agua facturada (consumida) por los usuarios entre el volumen de agua producida en el sistema de agua potable en un tiempo determinado. Es importante mencionar que el agua consumida no necesariamente es el agua facturada, debido a las imprecisiones de los micromedidores, la asignación de consumos de cuotas fijas, errores de lectura y facturación.

No obstante, en ausencia de datos se puede utilizar el valor del consumo facturado como una aproximación para calcular el indicador de eficiencia física, en tanto se resuelven los errores mencionados (Ecuación 5.3).

se han logrado valores superiores a 85 por ciento. Valores inferiores al 80 por ciento reflejan oportunidades de ahorro de agua importantes para el organismo operador y en la conservación de las fuentes de abastecimiento.

5.4. DOTACIÓN PROMEDIO POR HABITANTE (DP)

Cálculo

Indica el nivel de dotación comparativa respecto a los estándares de consumo por parte de los usuarios finales. Se calcula dividiendo el volumen suministrado entre el número total de habitantes servidos (Ecuación 5.4).

Meta

La dotación promedio de una localidad incluye el consumo doméstico y las partes proporcionales a los usos no domésticos y fugas que les corresponderían hipotéticamente a los habitantes de una localidad. En México, se recomienda estimar el consumo doméstico considerando el tipo de clima y la distribución porcentual de las clases socioeconómicas existentes en una localidad. El valor de la dotación dependerá de otros factores importantes, como el desarrollo comercial, industrial y hotelero y, en buena medida, de la cantidad de fugas que prealezcan en la red de tubería. No obstante, se estima que un valor medio nacional de dotación es adecuado si es del orden de los 220 L/(hab d).

$$D_p = \frac{\text{Volumen}_{\text{suministrado}} (m^3/\text{año})}{365N_{\text{habitantes servidos}}} \times 1000$$

Ecuación 5.4

5.5. INDICADOR DE CONTINUIDAD EN EL SERVICIO (ICS)

Cálculo

Indica el nivel de tandeos y el potencial de mejora del servicio. Se determina como la división de las horas de servicio continuo entre las horas naturales. Su valor se calcula con la Ecuación 3.3 presentada en la sección 3.1.3 de este libro.

$$hr_{\text{servicio}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_z} \%0_{z,i} hr_{\text{servicio},i}}{24}$$

Ecuación 3.3

Meta

Todos los sistemas de agua potable deberían cumplir con un servicio continuo, las 24 horas del día, los 365 días del año. Un indicador de continuidad en el servicio igual a uno implica que el servicio es muy eficiente y deseable. En la medida en que el indicador de continuidad disminuya, se tratará de sistemas de agua potable con menor eficiencia.

CONCLUSIONES

El servicio que se entrega a los consumidores de agua potable debería ser completamente efectivo, pero ya sea por fugas, errores en la medición, consumo clandestino, pérdidas por obstrucciones e incluso por una deficiente administración, la eficiencia total del sistema se ve reducida de manera importante, lo cual disminuye la calidad del servicio.

Es indispensable la ejecución de diversas acciones para reducir los diferentes tipos de pérdidas que se presentan a lo largo del camino, desde la fuente hasta llegar a los consumidores, como la localización y reparación de fugas. La cuantificación de las pérdidas funciona como guía para conocer los equipos que deben ser reemplazados o instalados a lo largo del sistema, así como para proponer modificaciones que lo hagan más eficiente. La parte contradictoria de este punto es que al destinar recursos de mejora de la red, se limita la posible inversión para aumentar la capacidad de abastecimiento a nuevos núcleos de población.

Actualmente, los avances tecnológicos nos permiten mejorar los procesos de medición y detección en el caso de las fugas dentro de la red, pero se requieren recursos económicos con los que no siempre cuentan los organismos operadores. Esto debe ser analizado por un grupo de especialistas, organizaciones gubernamentales e incluso iniciativa privada, para poner en marcha proyectos o programas cuyo fin sea brindar mejor servicio de agua potable a la población. Por lo tanto, debe existir retroalimentación y cooperación dentro y entre los organismos encargados en cuanto a experiencias se refiere para encaminar las acciones hacia la reducción de fugas y mejora de la eficiencia física.

En este libro se recopila información en torno a la eficiencia física, la problemática existente, su evaluación y los posibles mecanismos para su solución, tanto teóricamente como en campo. Recuerde que los procedimientos y datos presentados en este libro obedecen a la experiencia vertida a lo largo del tiempo por parte de los especialistas en la materia y de los proyectos en los que se ha trabajado. Sin embargo, en ningún caso debe considerarse esta información como reglamento o norma oficial, más bien debe ser considerada una guía para el diseño y la selección de alternativas que conduzcan a la eficiencia física.

A

A.1. FORMATOS PARA RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN Y DATOS

Tabla A.1 Formato con información general de la localidad

Nombre:														
Municipio:														
Estado:														
Coordenadas geográficas	Latitud:													
	Longitud:													
	Altitud media:													
Superficie de la mancha urbana:														
Distancia a ciudades vecinas	Ciudad				Orientación				Distancia (km)					
					Norte:									
					Sur:									
					Este:									
				Oeste:										
Clima	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media	
Temperatura °C														
Precipitación (mm)														
Cuerpos de agua cercanos (ríos, lagos, presas, etc.)	Nombre						Distancia (km)							
Población censal (INEGI)														
Año	Población (habitantes)				Tasa de crecimiento %		Número de viviendas		Índice de hacinamiento					
1980														
1990														
2000														
2005														
Número total de unidades consumidoras de agua (con y sin conexión)	Vivienda	Comercio	Industria	Hotel			Oficina pública			Escuela				

Tabla A.2 Formato infraestructura hidráulica

Infraestructura hidráulica				Agua potable			
Anexar el esquema del sistema de abastecimiento de agua potable, mostrando la localización y las principales características de todos los elementos que lo componen y el contorno de la mancha urbana							
Fuentes de abastecimiento (lago, presa, río, acuífero, manantial, otro)							
Tipo	Nombre	Caudales (L/s)			Extracción anual (m³ x 1000)	Concesión (si/no)	
		Mínimo	Medio	Máximo			
Total							
Conducciones (acero, fierro fundido, PVC, concreto, A-C, PEAD, otro)							
Origen / destino	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Material	Caudales (L/s)		Edad (años)	Estado físico (% bueno)
				Diseño	Operación		
Equipos de bombeo							
Nombre	Potencia (HP)	Presión manométrica (kg/cm²)	Caudales (L/s)		Edad (años)	Estado físico (% bueno)	
			Diseño	Operación			
Plantas potabilizadoras (cloración, filtración rápida, filtración lenta, convencional completo, otro)							
Nombre y ubicación	Tipo de proceso	Capacidad (L/s)		Edad (años)	Estado físico (% bueno)		
		Instalada	Operación				
Tanques de regularización (elevado, superficial, subterráneo, mampostería, concreto, acero)							
Nombre y ubicación	Tipo	Material	Volumen	Edad (años)	Estado físico (% bueno)		
Diámetro (pulgadas)	Materiales						Total
	Fierro fundido	Fierro galvanizado	Asbesto-cemento	PVC	PEAD	Otros	
2							
2½							
3							
4							
6							
8							
10							
12							
14							
16							
18							
20							
24							
30							
Total							

Tabla A.2 Formato infraestructura hidráulica (continuación)

Edad de la red (% longitud)	0 a 5 años	5.1 a 10 años	10.1 a 20 años	Más de 20 años			
Edad de la red (% longitud)	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo			
Válvulas y dispositivos de protección a la red	Seccionamiento	Retención	Purga	Alivio	VAEA	VRP	Cajas de válvulas
Cantidad							
Estado físico actual (Bueno %)							
Conexiones domiciliarias (cantidad)							
Diámetro (pulgadas)	Materiales						Total
	Cobre	Fierro galvanizado	PVC	PEAD	Otros		
1/2							
3/4							
1							
1 1/2							
2							
Total							

Tabla A.3 Formato infraestructura hidráulica, suministro de agua

Los datos presentados aquí deben ser obtenidos de los registros de macromedición y corregidos con los resultados de la campaña de medición					
Nivel de cobertura (%)			Volumen anual producido (m³ x 1000)		
Distribución temporal de producción de agua (últimos 12 meses)					
Mes/año	Caudal (L/s)		Volumen producido (m ³ x 1000)		
Total					
Continuidad en el servicio (promedio semanal)					
Continuidad (horas/día)	24	de 18 a 23	de 12 a 17	de 6 a 11	menos de 6
Cantidad de conexiones (%)					

Tabla A.4 Formato infraestructura hidráulica, macromedición

Se deben ubicar los macromedidores existentes en un esquema y sobre un croquis del sistema de abastecimiento

Macromedidores instalados

Primarios de caudal	Tipo	Cantidad	Funcionando	Error de exactitud (%)	Frecuencia de calibración	Estado físico (bueno, regular, malo)
Presión diferencial						
Velocidad						
Electromagnético						
Ultrasónico						
Otro						
Primarios de presión						
Primarios de nivel						
Regla móvil						
Escala graduada						
Manguera						
Flotador						

Grado de cobertura de macromedidores

Lugar	Porcentaje existente (%)	Macromedidores faltantes
Captaciones		
Pozos		
Presas		
Galerías		
Manantiales		
Plantas potabilizadoras		
Puntos de suministro a la red		

Tabla A.5 Formato infraestructura hidráulica, cuantificación de pérdidas

Calcular los valores de pérdidas en porcentaje del volumen suministrado (%) siguientes en los últimos doce meses

Pérdidas globales del sistema	
Pérdidas en conducción	
Pérdidas en potabilización	
Pérdidas en distribución	

Tabla A.6 Formato infraestructura hidráulica, control de fuga

Ubicar en un croquis anexo de la red de distribución, las zonas con mayor incidencia de fugas				
Incidencia de fugas en los últimos doce meses			Ocurrencia de fugas	
Mes/año	Cantidad	Volumen de pérdidas (m ³ x1000)	Lugar	Porcentaje (%)
			Red secundaria	
			Red primaria	
			Tomas domiciliarias	
			Válvulas	
			Otros	
Total			Total	100
Clasificación de fugas (ocurrencia anual)				
Tipo de fugas	Cantidad	Porcentaje (%)		
Visible				
Ocultas				
Total				
Clasificación de fugas por tipo de material (ocurrencia anual)				
Material donde ocurren las fugas	Red (%)	Conexiones domiciliarias (%)		
Visible				
Ocultas				
Total				
Causa de fugas (ocurrencia anual)				
Causas	Red (%)	Conexiones domiciliarias (%)		
Diseño				
Mala calidad del material				
Mal almacenamiento y manejo				
Defectos de instalación				
Sobrepresión hidráulica				
Tráfico pesado				
Profundidad insuficiente				
Agresión del terreno				
Otras (especificar)				
Total				
Detección de fugas				
Fugas visibles (%)	Fugas ocultas (%)			
Por inspección del organismo	Recorrido por la red			
Operadores	Medición de consumo nocturno			
Reportes del público	Recorrido selectivo de la red			
Total	Total			

NOTA: Se debe anotar los equipos utilizados para la localización de fugas (geófono, localizador de metales, detector electrónico, correlador, otros)

Tabla A.6 Formato infraestructura hidráulica, control de fuga (continuación)

Personal de detección de fugas			
Personal		Cantidad	
Ingenieros			
Técnicos			
Auxiliares			
Reparación de fugas (últimos doce meses)			
Mes/año	Cantidad		
	Reportadas	Reparadas (%)	
Total			
Tiempo, personal y caudales promedio de reparación de fugas			
Lugar de la fuga	Tiempo (horas)	Personal	Caudal medio (L/s)
Red primaria			
Red secundaria			
Tomas domiciliarias			
Válvulas			
Otros			

Tabla A.7 Formato sistema comercial, consumo de agua

Los datos presentados aquí deben provenir del padrón de usuarios y del registro de facturación de los volúmenes consumidos, y serán corregidos con las campañas de mediciones de campo

Consumo promedio en conexiones con micromedidor (m³/mes/conexión)

Consumo promedio en conexiones sin micromedidor (m³/mes/conexión)

Clasificación de usuarios por tipo de conexión

Tipo	Cantidad de conexiones	
	Número	Porcentaje
Doméstico individual		
Doméstico colectivo		
Comercial		
Hotelero		
Industrial		
Público		
Total		

Distribución por intervalos de consumo (promedio mensual)

Rango de consumo (m ³ /toma/mes)	Cantidad de conexiones		Volúmenes (m ³ x1000)	
	Número	Porcentaje	Número	Porcentaje
0 a 10				
10.1 a 15				
15.1 a 20				
20.1 a 30				
30.1 a 50				
50.1 a 100				
100.1 a 200				
200.1 a 500				
500.1 a 1000				
Más de 1000				
Total				

Tabla A.8 Formato sistema comercial micromedición

Micromedidores instalados				
Capacidad (m ³ /hora)	Exactitud media (%)	Cantidad (número/ porcentaje)	Marca	Antigüedad total (%)
				0 a 3 años (%)
				3.1 a 5 años (%)
				5.1 a 10 años (%)
				10.1 a 20 años (%)
				Más de 20 años (%)

Total

Cobertura de micromedición			
Cobertura de micromedición	$Cob_{micro} = \frac{\text{Micromedidores}}{\text{\# tomas domiciliarias}}$	Cobertura de micromedidores funcionando	$Cob_{micro} = \frac{\text{Micromedidores funcionando}(100)}{\text{\# tomas domiciliarias}}$

Cobertura de macromedición			
Sustitución micromedidores	de	Método de detección de fallas	

Distribución de consumos en micromedidores			
Tamaño del micromedidor (pulgadas)	Número de micromedidores	Consumo anual (m ³)	Porcentaje de consumo (%)
5/8			
¾			
1			
1			
1 ½			
2			
3			
4			
Sin micromedidor			
Total			

Mes	Tipo de uso			Total (m ³)
	Doméstico (m ³)	Comercial (m ³)	Industrial (m ³)	
Enero				
Febrero				
...				
Diciembre				
Total				

Número de usuarios por nivel socioeconómico			
	Residencial (m ³)	Medio (m ³)	Popular (m ³)
Enero			
Febrero			
...			
Diciembre			

Total

Tabla A.9 Formato de campo para levantamiento físico de inspección y aforo de fugas en tomas domiciliarias

Datos generales de la toma domiciliaria				
Nombre del usuario	Domicilio			
Sector		Ciudad		Fecha
Hora	Numero de toma			
Presiones (kg/cm ²)				
En frente		Lado	Domicilio	Lado

Material de la toma domiciliaria inspeccionada				
Tipo de tubería en la toma				
Fierro galvanizado	Polietileno	Cobre	Poliducto	PVC

Ubicación de domicilio (croquis)		

Excavación						
Profundidad respecto al nivel de calle						cm
Tipo de pavimento a lo largo de la toma					Estado del pavimento	
Concreto	Asfalto	Terracería	Empedrado	Otro	Bueno	Deteriorado
Material de excavación						
Arena	Grava	Tezontle	Tierra	Arcilla	Roca	Piedras Otros

Material de la tubería de la toma con fuga					Diámetro	Pulgadas	
Tipo de tubería de la toma con fuga					Estado		
Fierro galvanizado	Polietileno	Cobre	Poliducto	PVC	Bueno	Regular	Malo

Lugar de la fuga							
Abrazadera	Niple o cople	Codo	Tubería flexible	Tubería rígida	Tuerca unión del medidor	LLave de paso	Otro

Lugar de la fuga

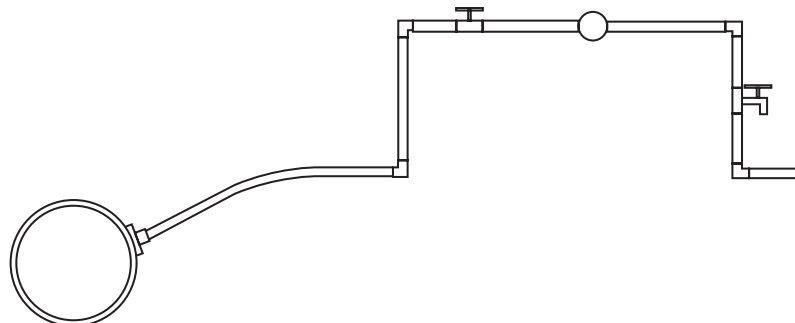


Tabla A.9 Formato de campo para levantamiento físico de inspección y aforo de fugas en tomas domiciliarias (continuación)

Tipo de fuga						
Rajadura	Perforación	Rotura	Corte	Rosca floja	Otro	(especificar)
Aforo de fuga						
Número de medición	Volumen (mL)			Tiempo (s)		
1						
2						
3						
Promedio						
Reparación	Hora de inicio					
	Hora de terminación					
Número de personas de la brigada						
Equipo de medición utilizado						

Tabla A.10 Formato típico para encuestas de verificación de tomas domiciliarias

				Sobre el predio				Sobre la toma						
Actualización de padrón de usuarios				En uso	Doméstico	Alimentos	No accesible	Menor a 50 cm	Con fuga	½				
				Con cisterna Abandonado	Comercial Industrial	Ventas Oficina	Accesible protegido	Mayor a 50 cm		¾				
				Baldío	Mixto	Público	Accesible no protegido		Sin fuga	1 ½				
				Sin cisterna						2				
				En construcción										
Cuenta	Nº.	Giro	Nombre del usuario/ Dirección	Número catastral	Estado	Cisterna	Tomas o viviendas	Folio	Uso	Giro	Posición	Longitud	Fuga	Diámetro
Sobre el medidor				Opinión del usuario				Colonias:						
Marca 1	Buen estado	Drenaje	Red	Continuo	Excelente	Siempre sube al tinaco	Excelente							
Marca 2	Lectura borrosa	Fosa	Unas horas por día	Buena	Buena	No siempre sube al tinaco	Buena							Sector:
Marca 3	Lectura visible	Letrina	Cada 3 días	Regular	Regular	Solo a segundo nivel	Regular							Ruta:
Otro	No funciona	Barranca	Cada semana	Mala	Mala	Solo a primer nivel	Malo							
			Abierto	Menos de 4 días por mes	Muy mala	Solo a cisterna	Muy malo							
Número de medidor	Marca del medidor	Estado del medidor	Descarga a:	Frecuencia del servicio	Calidad del agua	Presión llegada	Opinión de servicio	del	Observaciones	Firma encuestado				



A.2. PROPIEDADES HIDRÁULICAS Y MEDICIÓN

Ilustración A.1 Curva típica de exactitud de medidores de agua potable

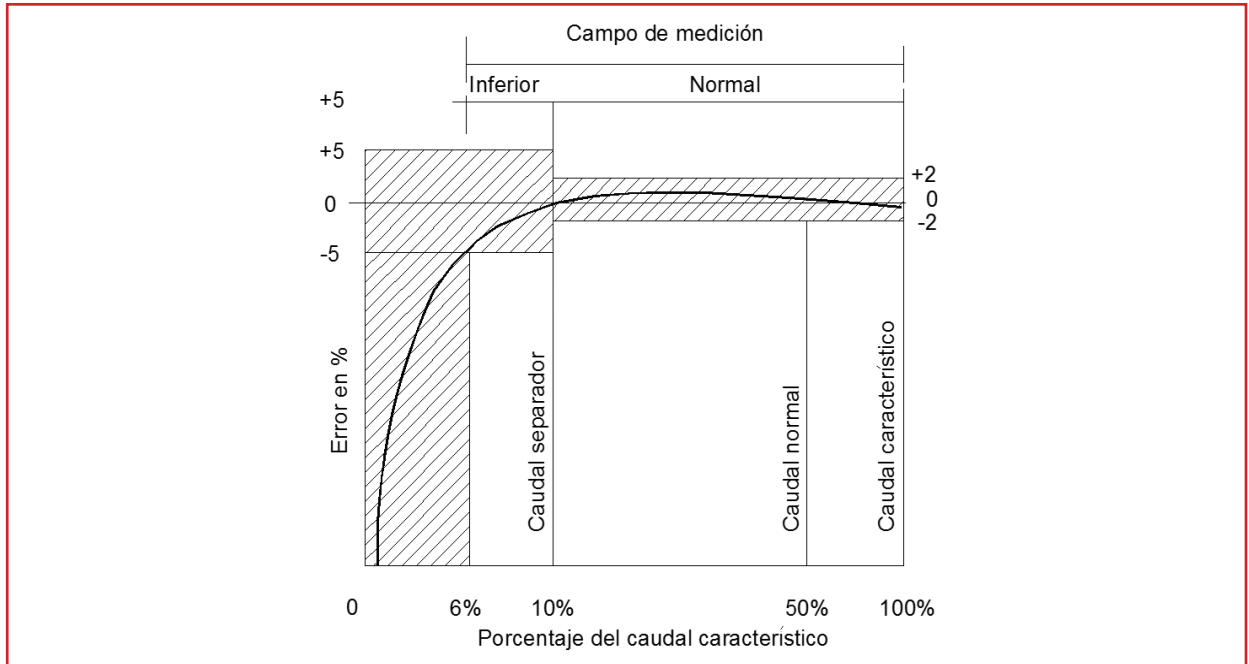
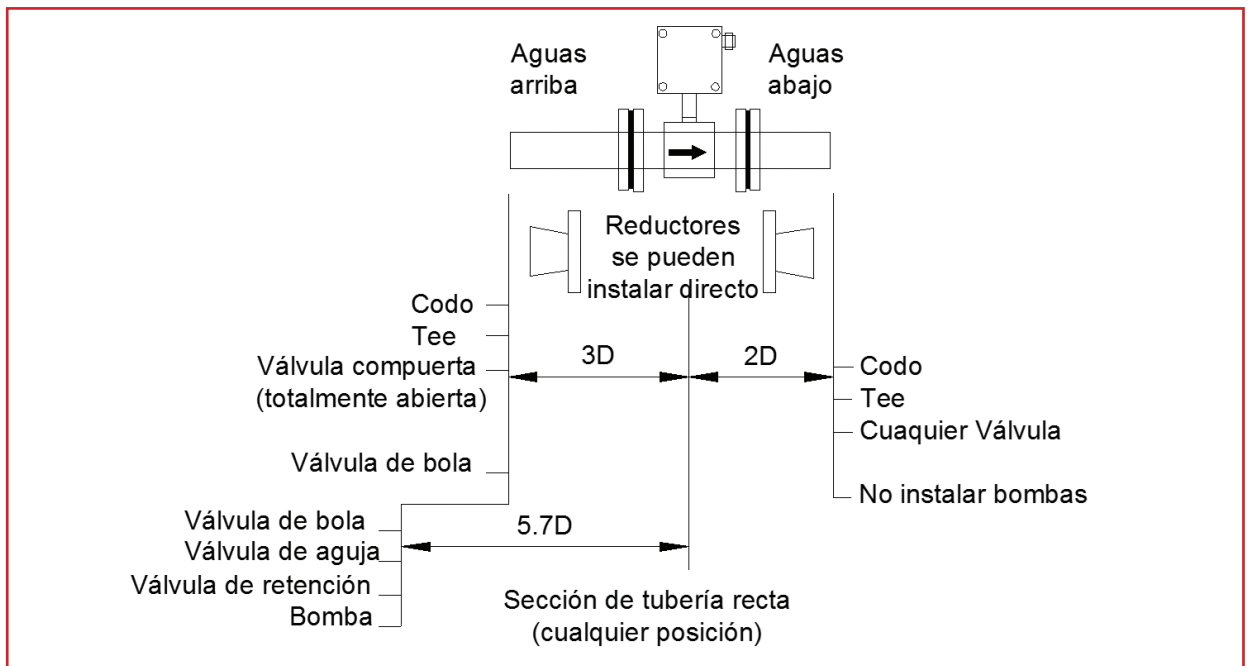


Ilustración A.2 Distancias para ubicar un medidor electromagnético y obtener mediciones confiables





A.3. FORMATO DEL BALANCE DE AGUA

Tabla A.11 Formato del balance de agua

Balance de agua potable		
Período de análisis (días):		
Lugar: distrito hidrométrico	Unidad: m ³	
Línea	Concepto	Cantidad m ³
Tarea 1. Cuantificación del suministro de agua		
1	Suministro total de agua sin corregir	
2A	Error en exactitud de medidores de la fuente de abastecimiento (+ o -)	
2B	Cambio en reservas y tanques de almacenamiento (+ o -)	
2C	Otras contribuciones o pérdidas (+ o -)	
3	Total de ajustes en el suministro total del agua (sumar líneas 2A, 2B y 2C)	
4	Suministro total de agua corregido (sumar líneas 1 y 3)	
Tarea 2. Estimación de consumos medidos autorizados		
5	Consumo medio total de agua autorizado sin corregir	
Tarea 3. Estimación de consumos no medidos autorizados		
6	Usuarios con cuota fija	
7	Reparación de tuberías	
8	Proceso de plantas de tratamiento y potabilizadoras	
9	Escuelas	
10	Parques públicos	
11	Agua para incendio	
12	Otros servicios	
13	Consumo total no medido autorizado (sumar líneas 6 a 12)	
Tarea 4. Pérdidas identificadas y eliminadas		
14	Error en medidores domésticos (+ o -)	
15	Error en medidores comerciales, industriales y especiales (+ o -)	
16	Error de defase en periodo de lectura del medidor (+ o -)	
17	Usos clandestinos regularizados	
18	Fugas reparadas (eliminadas)	
19	Errores en cuota fija (+ o -)	
20	Derrames en tanques y cárcamos de bombeo	
21	Evaporación en depósitos abiertos	
22	Errores descubiertos en el proceso contable	
23	Otras pérdidas	
24	Pérdidas totales identificadas y eliminadas (sumar líneas 14 a 23)	
Tarea 5. Estimación de pérdidas potenciales totales		
25	Pérdidas potenciales de agua potable (restar líneas 5,13 y 24 de 4)	
Tarea 6. Estimación de pérdidas aparentes potenciales		
26	Usos clandestinos	
27	Fraudes	
28	Pérdidas aparentes totales potenciales	

Tabla A.11 Formato del balance de agua (continuación)

Tarea 7. Estimación de pérdidas reales potenciales		
Línea	Concepto	Cantidad m ³
29	Fugas en tomas domiciliarias	
30	Fugas en tuberías	
31	Fugas en cajas de válvulas	
32	Otras fugas	
33	Pérdidas reales potenciales (totales por fugas)	

BIBLIOGRAFÍA

- Alegre, Helena. (1998). *Indicadores de gestión para abastecimientos de agua, tendencias actuales y proyectos de desarrollo*, National Civil Engineering Laboratory, Lisboa, Portugal, Gestión de Sequías en Abastecimientos Urbanos, Universidad de Politécnica de Valencia, Grupo de Mecánica de Fluidos, España.
- Arreguín-Cortés, F. y Ochoa Alejo L. (1997). Evaluation of Water Losses in Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(5), 284-291.
- Cabrera R. E. y Cabrera M. E. (2004). *Técnicas modernas de rehabilitación y renovación de tuberías. Evaluación y control de pérdidas en redes urbanas*. Instituto Tecnológico del Agua, UPV, España.
- CONAGUA. (2009). *Manual de incremento de eficiencia física, hidráulica y energética en sistemas de agua potable*.
- CONAGUA. (2005). *Planeación de acciones de incremento y control de la eficiencia en sistemas de agua potable*. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana.
- CONAGUA. (2008). *Programa de seguimiento de indicadores de gestión para cumplimiento de meta de eficiencia global. Manual de indicadores*. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México.
- CONAGUA. (2007). *Sectorización en redes de agua potable*. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México.
- CONAGUA. (2013). *Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México.
- Des Raj. (1992) *Teoría del muestreo*. Fondo de Cultura Económica, Segunda Edición, México.
- IMTA. (1999). *Estudio de rehabilitación de tuberías en Saltillo, Coahuila*. IMTA, México.
- <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4523/7/NOM001ENER2000.pdf>
- http://www.sener.gob.mx/webSener/res/Acerca_de_nom-006-ener-95.pdf
- <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4523/7/NOM010ENER2004.pdf>
- NOM-012-SCFI-1994: Medición de flujo de agua en conductos cerrados de sistemas hidráulicos-Medidores para agua potable fría-Especificaciones.
- <http://www.economia.gob.mx/work/normas/noms/1997/012-scfi.pdf>
- Comisión Federal de Electricidad <http://www.cfe.gob.mx>

- Ochoa A.L. y Bourguett, O.V. (1998). *Reducción integral de pérdidas de agua potable*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA. Jiutepec, Morelos, México.
- Ochoa Alejo L. y Reyes Medel L. (2008). *Generación y corrección de información para la conformación de balances de agua en sistemas de distribución de agua potable*.
- Memorias del XX Congreso Nacional de Hidráulica (2008), AMH, Toluca, México.
- SENAPA, OPS, SEPIS. (1985). *Lineamientos para la formulación de un programa nacional de reducción de pérdidas*.
- Spiegel. (1991). *Estadística*. Segunda Edición, España.
- Wallace, Lynn P. (1987). *Water and Revenue Losses: Unaccounted for Water* (Research Report/AWWA Research Foundation).

TABLA DE CONVERSIONES DE UNIDADES DE MEDIDA

Sigla	Significado	Sigla	Significado
mg	miligramo	kg/m ³	kilogramo por metro cúbico
g	gramo	l/s	litros por segundo
kg	kilogramo	m ³ /d	metros cúbicos por día
mm	milímetro	Sm ³ /h	condiciones estándar de metro cúbico por hora
cm	centímetro	Scfm	condiciones estándar de pies cúbicos por minuto
m	metro	°C	grados Celsius
ml	mililitro	psia	libra-fuerza por pulgada cuadrada absoluta
l	litro	cm/s	centímetro por segundo
m ³	metro cúbico	m/s	metro por segundo
s	segundo	HP	caballo de fuerza (medida de energía)
h	hora	kW	kilowatt
d	día	UNT	unidades nefelométricas de turbiedad
mg/l	miligramo por litro		

Longitud

Sistema métrico	Sistema Inglés	Siglas
1 milímetro (mm)	0.03	in
1 centímetro (cm) = 10 mm	0.39	in
1 metro (m) = 100 cm	1.09	yd
1 kilómetro (km) = 1 000 m	0.62	mi
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 pulgada (in)	2.54	cm
1 pie (ft) = 12 pulgadas	0.30	m
1 yarda (yd) = 3 pies	0.91	m
1 milla (mi) = 1 760 yardas	1.60	km
1 milla náutica (nmi) = 2 025.4 yardas	1.85	km

Superficie

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm ² = 100 mm ²	0.15	in ²
1 m ² = 10 000 cm ²	1.19	yd ²
1 hectárea (ha) = 10 000 m ²	2.47	acres
1 km ² = 100 ha	0.38	mi ²
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 in ²	6.45	cm ²
1 ft ² = 144 in ²	0.09	m ²
1 yd ² = 9 ft ²	0.83	m ²
1 acre = 4 840 yd ²	4 046.90	m ²
1 milla ² = 640 acres	2.59	km ²

Volumen/capacidad

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm ³	0.06	in ³
1 dm ³ = 1 000 cm ³	0.03	ft ³
1 m ³ = 1 000 dm ³	1.30	yd ³
1 litro (L) = 1 dm ³	1.76	pintas
1 hectolitro (hL) = 100 L	21.99	galones
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 in ³	16.38	cm ³
1 ft ³ = 1 728 in ³	0.02	m ³
1 onza fluida EUA = 1.0408 onzas fluidas RU	29.57	mL
1 pinta (16 onzas fluidas) = 0.8327 pintas RU	0.47	L
1 galón EUA = 0.8327 galones RU	3.78	L

Masa/peso

Sistema métrico	Sistema inglés	
1 miligramo (mg)	0.0154	grano
1 gramo (g) = 1 000 mg	0.0353	onza
1 kilogramo (kg) = 1 000 g	2.2046	libras
1 tonelada (t) = 1000 kg	0.9842	toneladas larga
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 onza (oz) = 437.5 granos	28.35	g
1 libra (lb) = 16 oz	0.4536	kg
1 stone = 14 lb	6.3503	kg
1 hundredweight (cwt) = 112 lb	50.802	kg
1 tonelada larga = 20 cwt	1.016	t

Temperatura

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32)$$

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} (^{\circ}\text{C}) + 32$$

Otros sistemas de unidades		Multiplicado por	Sistema Internacional de Unidades (SI)	
Unidad	Símbolo	Factor de conversión	Se convierte a	
Longitud				
Pie	pie, ft.,'	0.30	metro	m
Pulgada	plg, in,"	25.40	milímetro	mm
Presión/esfuerzo				
Kilogramo fuerza/cm ²	kg _f /cm ²	98 066.50	pascal	Pa
Libra/pulgada ²	lb/ plg ² , PSI	6 894.76	pascal	Pa
atmósfera técnica	at	98 066.50	pascal	Pa
metro de agua	m H ₂ O (mca)	9 806.65	pascal	Pa
mm de mercurio	mm Hg	133.32	pascal	Pa
bar	bar	100 000.00	pascal	Pa
Fuerza/ peso				
kilogramo fuerza	kg _f	9.80	newton	N
Masa				
libra	lb	0.45	kilogramo	kg
onza	oz	28.30	gramo	g
Peso volumétrico				
kilogramo fuerza/m ³	kg _f /m ³	9.80	N/m ³	N/m ³
libra /ft ³	lb/ft ³	157.08	N/m ³	N/m ³
Potencia				
caballo de potencia	CP, HP	745.69	watt	W
caballo de vapor	CV	735.00	watt	W
Viscosidad dinámica				
poise	μ	0.01	pascal segundo	Pa s
Viscosidad cinemática				
viscosidad cinemática	v	1	stoke	m ² /s (St)
Energía/ Cantidad de calor				
caloría	cal	4.18	joule	J
unidad térmica británica	BTU	1 055.06	joule	J
Temperatura				
grado Celsius	°C	tk=tc + 273.15	grado Kelvin	K

Nota: El valor de la aceleración de la gravedad aceptado internacionalmente es de 9.80665 m/s²

Longitud								
de / a	mm	cm	m	km	mi	milla náutica (nmi)	ft	in
mm	1.000	0.100	0.001					
cm	10000	1.000	0.010				0.033	0.394
m	1 000.000	100.000	1.000	0.001			3.281	39.370
km			0.001	1.000	0.621	0.540	3 280.83	0.039
mi			1 609.347	1.609	1.000	0.869	5 280.000	
nmi			1 852.000	1.852	1.151	1.000	6 076.115	
ft		30.480	0.305				1.000	12.000
in	25.400	2.540	0.025				0.083	1.000

Superficie								
de / a	cm ²	m ²	km ²	ha	mi ²	acre	ft ²	in ²
cm ²	1.00						0.001	0.155
m ²	10 000.00	1.00					10.764	1 550.003
km ²			1.000	100.000	0.386	247.097		
ha		10 000.00	0.010	1.000	0.004	2.471		
mi ²			2.590	259.000	1.000	640.000		
acre		4 047.00	0.004	0.405	0.002	1.000		
ft ²	929.03	0.09					1.000	0.007
in ²	6.45						144.000	1.000

Volumen								
de / a	cm ³	m ³	L	ft ³	gal. EUA	acre-ft	in ³	yd ³
cm ³	1.000		0.001				0.061	
m ³		1.000	1 000.000	35.314	264.200			1.307
L	1 000.000	0.001	1.000	0.035	0.264		61.023	
ft ³		0.028	28.317	1.000	7.481			0.037
gal. EUA		0.004	3.785	0.134	1.000		230.974	
acre-ft		1 233.490				1.000		
in ³	16.387		0.016		0.004		1.000	
Yd ³		0.765		27.000				1.000

Gasto								
de / a	l/s	cm ³ /s	gal/día	gal/min	l/min	m ³ /día	m ³ /h	ft ³ /s
l/s	1.000	1 000.000		15.851	60.000	86.400	3.600	0.035
cm ³ /s	0.001	1.000	22.825	0.016	0.060	0.083		
gal/día		0.044	1.000			0.004		
gal/min	0.063	63.089	1 440.000	1.000	0.000	5.451	0.227	0.002
l/min	0.017	16.667	0.000	0.264	1.000	1.440	0.060	
m ³ /día	0.012	11.570	264.550	0.183	0.694	1.000	0.042	
m ³ /h	0.278		6 340.152	4.403	16.667	24.000	1.000	0.010
ft ³ /s	28.316			448.831	1 698.960	2 446.590	101.941	1.000

Eficiencia de pozo			
de	a	gal/min/pie	l/s/m
gal/min/pie		1.000	0.206
l/s/m		4.840	1.000

Permeabilidad							
de	a	cm/s	gal/día/Pie ²	millones gal/día/acre	m/día	pie/s	Darcy
cm/s		1.000	21 204.78		864.000	0.033	
gal/día/pie ²			1.000		0.041		0.055
millón gal/día/acre				1.000	0.935		
m/día		0.001	24.543	1.069	1.000		1.351
pie/s		30.480			26 334.72	1.000	
Darcy			18.200		0.740		1.000

Peso									
de	a	grano	gramo	kilogramo	libra	onza	tonelada corta	tonelada larga	tonelada métrica
Grano (gr)		1.000	0.065						
Gramo (g)		15.432	1.000	0.001	0.002				
Kilogramo (kg)			1 000.000	1.000	2.205	35.273			0.001
Libra (lb)			453.592	0.454	1.000	16.000			
Onza (oz)		437.500	28.350			1.000			
t corta				907.180	2 000.000		1.000		0.907
t larga				1 016.000	2 240.000		1.119	1.000	1.016
t métrica				1 000.000	2 205.000		1.101	0.986	1.000

Potencia									
de	a	CV	HP	kW	W	ft lb/s	kg m/s	BTU/s	kcal/s
CV		1.000	0.986	0.736	735.500	542.500	75.000	0.697	0.176
HP		1.014	1.000	0.746	745.700	550.000	76.040	0.706	0.178
kW		1.360	1.341	1.000	1 000.000	737.600	101.980	0.948	0.239
W				0.001	1.000	0.738	0.102		
ft lb/s					1.356	1.000	0.138	0.001	
kg m/s		0.013	0.013	0.009	9.806	7.233	1.000	0.009	0.002
BTU/s		1.434	1.415	1.055	1 055.000	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal/s		5.692	5.614	4.186	4 186.000	3 088.000	426.900	3.968	1.000

Presión								
de	a	atmósfera	Kg/cm ²	lb/in ²	mm de Hg	in de Hg	m de H ₂ O	ft de H ₂ O
atmósfera		1.000	1.033	14.696	760.000	29.921	10.330	33.899
kg/cm ²		0.968	1.000	14.220	735.560	28.970	10.000	32.810
lb/in ²		0.068	0.070	1.000	51.816	2.036	0.710	2.307
mm de Hg		0.001	0.001	0.019	1.000	0.039	0.013	0.044
in de Hg		0.033	0.035	0.491	25.400	1.000	0.345	1.133
m de agua		0.096	0.100	1.422	73.560	2.896	1.000	3.281
ft de agua		0.029	0.030	0.433	22.430	0.883	0.304	1.000

Energía									
de	a	CV hora	HP hora	kW hora	J	ft.lb	kgm	BTU	kcal
CV hora		1.000	0.986	0.736				2 510.000	632.500
HP hora		1.014	1.000	0.746				2 545.000	641.200
kW hora		1.360	1.341	1.000				3 413.000	860.000
J					1.000	0.738	0.102		
ft.lb					1.356	1.000	0.138		
kgm					9.806	7.233	1.000		
BTU					1 054.900	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal					4 186.000	3 087.000	426.900	426.900	1.000

Transmisividad				
de	a	cm ² /s	gal/día/pie	m ² /día
cm ² /s		1.000	695.694	8.640
gal/día/ft		0.001	1.000	0.012
m ² /día		0.116	80.520	1.000

Conversión de pies y pulgadas, a metros												
ft, in/m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0.000	0.025	0.051	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.279
1	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584
2	0.610	0.635	0.660	0.686	0.711	0.737	0.762	0.787	0.813	0.838	0.864	0.889
3	0.914	0.940	0.965	0.991	1.016	1.041	1.067	1.092	1.176	1.143	1.168	1.194
4	1.219	1.245	1.270	1.295	1.321	1.346	1.372	1.397	1.422	1.448	1.473	1.499
5	1.524	1.549	1.575	1.600	1.626	1.651	1.676	1.702	1.727	1.753	1.778	1.803
6	1.829	1.854	1.880	1.905	1.930	1.956	1.981	2.007	2.032	2.057	2.083	2.108
7	2.134	2.159	2.184	2.210	2.235	2.261	2.286	2.311	2.337	2.362	2.388	2.413
8	2.438	2.464	2.489	2.515	2.540	2.565	2.591	2.616	2.642	2.667	2.692	2.718
9	2.743	2.769	2.794	2.819	2.845	2.870	2.896	2.921	2.946	2.972	2.997	3.023
10	3.048	3.073	3.099	3.124	3.150	3.175	3.200	3.226	3.251	3.277	3.302	3.327
11	3.353	3.378	3.404	3.429	3.454	3.480	3.505	3.531	3.556	3.581	3.607	3.632
12	3.658	3.683	3.708	3.734	3.759	3.785	3.810	3.835	3.861	3.886	3.912	3.937
13	3.962	3.988	4.013	4.039	4.064	4.089	4.115	4.140	4.166	4.191	4.216	4.242
14	4.267	4.293	4.318	4.343	4.369	4.394	4.420	4.445	4.470	4.496	4.521	4.547
15	4.572	4.597	4.623	4.648	4.674	4.699	4.724	4.750	4.775	4.801	4.826	4.851
16	4.877	4.902	4.928	4.953	4.978	5.004	5.029	5.055	5.080	5.105	5.131	5.156
17	5.182	5.207	5.232	5.258	5.283	5.309	5.334	5.359	5.385	5.410	5.436	5.461
18	5.486	5.512	5.537	5.563	5.588	5.613	5.639	5.664	5.690	5.715	5.740	5.766
19	5.791	5.817	5.842	5.867	5.893	5.918	5.944	5.969	5.994	6.020	6.045	6.071
20	6.096	6.121	6.147	6.172	6.198	6.223	6.248	6.274	6.299	6.325	6.350	6.375
21	6.401	6.426	6.452	6.477	6.502	6.528	6.553	6.579	6.604	6.629	6.655	6.680
22	6.706	6.731	6.756	6.782	6.807	6.833	6.858	6.883	6.909	6.934	6.960	6.985
23	7.010	7.036	7.061	7.087	7.112	7.137	7.163	7.188	7.214	7.239	7.264	7.290
24	7.315	7.341	7.366	7.391	7.417	7.442	7.468	7.493	7.518	7.544	7.569	7.595
25	7.620	7.645	7.671	7.696	7.722	7.747	7.772	7.798	7.823	7.849	7.874	7.899
26	7.925	7.950	7.976	8.001	8.026	8.052	8.077	8.103	8.128	8.153	8.179	8.204
27	8.230	8.255	8.280	8.306	8.331	8.357	8.382	8.407	8.433	8.458	8.484	8.509
28	8.534	8.560	8.585	8.611	8.636	8.661	8.687	8.712	8.738	8.763	8.788	8.814
29	8.839	8.865	8.890	8.915	8.941	8.966	8.992	9.017	9.042	9.068	9.093	9.119
30	9.144	9.169	9.195	9.220	9.246	9.271	9.296	9.322	9.347	9.373	9.398	9.423
31	9.449	9.474	9.500	9.525	9.550	9.576	9.601	9.627	9.652	9.677	9.703	9.728
32	9.754	9.779	9.804	9.830	9.855	9.881	9.906	9.931	9.957	9.982	10.008	10.033
33	10.058	10.084	10.109	10.135	10.160	10.185	10.211	10.236	10.262	10.287	10.312	10.338
34	10.363	10.389	10.414	10.439	10.465	10.490	10.516	10.541	10.566	10.592	10.617	10.643
35	10.668	10.693	10.719	10.744	10.770	10.795	10.820	10.846	10.871	10.897	10.922	10.947

La segunda columna es la conversión de pies a metros; las siguientes columnas son la conversión de pulgadas a metros que se suman a la anterior conversión.

Tabla de conversión de pulgadas a milímetros								
Pulgadas	0	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
0	0	3.175	6.35	9.525	12.7	15.875	19.05	22.225
1	25.4	28.575	31.75	34.925	38.1	41.275	44.45	47.625
2	50.8	53.975	57.15	60.325	63.5	66.675	69.85	73.025
3	76.2	79.375	82.55	85.725	88.9	92.075	95.25	98.425
4	101.6	104.775	107.95	111.125	114.3	117.475	120.65	123.825
5	127.0	130.175	133.35	136.525	139.7	142.875	146.05	149.225
6	152.4	155.575	158.75	161.925	165.1	168.275	171.45	174.625
7	177.8	180.975	184.15	187.325	190.5	193.675	196.85	200.025
8	203.2	206.375	209.55	212.725	215.9	219.075	222.25	225.425
9	228.6	231.775	234.95	238.125	241.3	244.475	247.65	250.825
10	254.0	257.175	260.35	263.525	266.7	269.875	273.05	276.225
11	279.4	282.575	285.75	288.925	292.1	295.275	298.45	301.625
12	304.8	307.975	311.15	314.325	317.5	320.675	323.85	327.025
13	330.2	333.375	336.55	339.725	342.9	346.075	349.25	352.425
14	355.6	358.775	361.95	365.125	368.3	371.475	374.65	377.825
15	381.0	384.175	387.35	390.525	393.7	396.875	400.05	403.225
16	406.4	409.575	412.75	415.925	419.1	422.275	425.45	428.625
17	431.8	434.975	438.15	441.325	444.5	447.675	450.85	454.025
18	457.2	460.375	463.55	466.725	469.9	473.075	476.25	479.425
19	482.6	485.775	488.95	492.125	495.3	498.475	501.65	504.825
20	508.0	511.175	514.35	517.525	520.7	523.875	527.05	530.225
21	533.4	536.575	539.75	542.925	546.1	549.275	552.45	555.625
22	558.8	561.975	565.15	568.325	571.5	574.675	577.85	581.025
23	584.2	587.375	590.55	593.725	596.9	600.075	603.25	606.425
24	609.6	612.775	615.95	619.125	622.3	625.475	628.65	631.825
25	635.0	638.175	641.35	644.525	647.7	650.875	654.05	657.225
26	660.4	663.575	666.75	669.925	673.1	676.275	679.45	682.625
27	685.8	688.975	692.15	695.325	698.5	701.675	704.85	708.025
28	711.2	714.375	717.55	720.725	723.9	727.075	730.25	733.425
29	736.6	739.775	742.95	746.125	749.3	752.475	755.65	758.825
30	762.0	765.175	768.35	771.525	774.7	777.875	781.05	784.225

Fórmulas generales para la conversión de los diferentes sistemas

Centígrados a Fahrenheit	$^{\circ}\text{F}=9/5^{\circ}\text{C}+32$
Fahrenheit a Centígrados	$^{\circ}\text{C}=5/9 (^{\circ}\text{F}-32)$
Réaumur a Centígrados	$^{\circ}\text{C}=5/4 ^{\circ}\text{R}$
Fahrenheit a Réaumur	$^{\circ}\text{R}=4/9 (^{\circ}\text{F}-32)$
Réaumur a Fahrenheit	$^{\circ}\text{F}=(9/4^{\circ}\text{R})+32$
Celsius a Kelvin	$^{\circ}\text{K}=273.15+^{\circ}\text{C}$
Fahrenheit a Rankine	$^{\circ}\text{Ra}=459.67+^{\circ}\text{F}$
Rankine a Kelvin	$^{\circ}\text{K}=5/9^{\circ}\text{Ra}$

Factores químicos de conversión					
	A	B	C	D	E
Constituyentes	eppm a ppm	ppm a epm	eppm a gpg	gpg a epm	ppm a ppm CaCO ₃
calcio Ca ⁺²	20.04	0.04991	1.1719	0.8533	2.4970
hierro Fe ⁺²	27.92	0.03582	1.6327	0.6125	1.7923
magnesio Mg ⁺²	12.16	0.08224	0.7111	1.4063	4.1151
potasio K ⁺¹	39.10	0.02558	2.2865	0.4373	1.2798
sodio Na ⁺¹	23.00	0.04348	1.3450	0.7435	2.1756
bicarbonato (HCO ₃) ⁻¹	61.01	0.01639	3.5678	0.2803	0.8202
carbonato (CO ₃) ⁻²	30.00	0.03333	1.7544	0.5700	1.6680
cloro (Cl) ⁻¹	35.46	0.02820	2.0737	0.4822	1.4112
hidróxido (OH) ⁻¹	17.07	0.05879	0.9947	1.0053	2.9263
nitrito (NO ₂) ⁻¹	62.01	0.01613	3.6263	0.2758	0.8070
fosfato (PO ₄) ⁻³	31.67	0.03158	1.8520	0.5400	1.5800
sulfato (SO ₄) ⁻²	48.04	0.02082	2.8094	0.3559	1.0416
bicarbonato de calcio Ca(HCO ₃) ₂	805.00	0.01234	4.7398	0.2120	0.6174
carbonato de calcio (CaCO ₃)	50.04	0.01998	2.9263	0.3417	1.0000
cloruro de calcio (CaCl ₂)	55.50	0.01802	3.2456	0.3081	0.9016
hidróxido de calcio Ca(OH) ₂	37.05	0.02699	2.1667	0.4615	1.3506
sulfato de calcio (CaSO ₄)	68.07	0.01469	3.9807	0.2512	0.7351
bicarbonato férrico Fe(HCO ₃) ₃	88.93	0.01124	5.2006	0.1923	0.5627
carbonato férrico Fe ₂ (CO ₃) ₃	57.92	0.01727	3.3871	0.2951	0.8640
sulfato férrico Fe ₂ (CO ₄) ₃	75.96	0.01316	4.4421	0.2251	0.6588
bicarbonato magnésico Mg(HCO ₃) ₂	73.17	0.01367	4.2789	0.2337	0.6839
carbonato magnésico (MgCO ₃)	42.16	1.02372	2.4655	0.4056	1.1869
cloruro de magnesio (MgCl ₂)	47.62	0.02100	2.7848	0.3591	1.0508
hidróxido de magnesio Mg(OH) ₂	29.17	0.03428	1.7058	0.5862	1.7155
sulfato de magnesio (MgSO ₄)	60.20	0.01661	3.5202	0.2841	0.6312

eppm = equivalentes por millón

ppm = partes por millón

gpg = granos por galón

p.p.m. CaCO₃ = partes por millón de carbonato de calcio



ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1 Medición de presiones en la red	5
Ilustración 1.2 Posición del medidor de caudal	6
Ilustración 1.3 Curva típica de variación de la demanda de agua en una red de agua potable	7
Ilustración 1.4 Medición de error de exactitud en macromedidor instalado (color azul), con medidor portátil electromagnético de inserción	8
Ilustración 1.5 Equipo utilizado en pruebas de exactitud de micromedidores	10
Ilustración 1.6 Recipiente para verificación de exactitud en micromedidores	11
Ilustración 1.7 Prueba de campo de exactitud de medidores	12
Ilustración 1.8 Ficha técnica tipo de inspección de caja de válvulas	17
Ilustración 1.9 Croquis típico de recorrido para vinculación de tomas domiciliarias	20
Ilustración 1.10 Medición de tensión (voltaje) en equipos de bombeo	22
Ilustración 1.11 Medición de corriente eléctrica en equipos de bombeo	23
Ilustración 1.12 Medición del factor de potencia con amperímetro	23
Ilustración 1.13 Relación de corrientes de acuerdo con la relación de ángulos	24
Ilustración 1.14 Medición del factor de potencia con voltímetro	25
Ilustración 1.15 Relación de voltajes de acuerdo con la relación de ángulos	25
Ilustración 1.16 Medición de la potencia real antes de los capacitores	26
Ilustración 1.17 Medición de la potencia real después de los capacitores	26
Ilustración 1.18 Medición de presión con manómetro tipo Bourdon calibrado	27
Ilustración 1.19 Medición de niveles en caso de tener únicamente manómetro en la descarga de una bomba vertical	28
Ilustración 1.20 Medición de niveles en caso de tener manómetro en la succión y en la descarga	28
Ilustración 1.21 Medición del nivel dinámico de succión en cárcamos de bombeo	28
Ilustración 1.22 Medición del nivel dinámico de succión en cárcamos de bombeo	29
Ilustración 1.23 Curvas características reales $H-Q$ en pozos de un organismo operador	33
Ilustración 2.1 Estructura estándar del balance de agua Ochoa y Reyes (2008)	37
Ilustración 2.2 Bloques de actividades para elaborar un proyecto de eficiencia física	51
Ilustración 2.3 Ejemplos de presentación de estadísticas de fugas para identificar causas físicas de su ocurrencial	53

Ilustración 2.4 Ejemplo de un esquema gráfico de interrelación de los departamentos de un organismo operador con el proceso de control de fugas	55
Ilustración 2.5 Ejemplo típico de un árbol de problemas de fugas	56
Ilustración 2.6 Diagrama de diseño de subproyectos básicos para el control de fugas	60
Ilustración 2.7 Clasificación de fugas en sistemas de agua potable	61
Ilustración 2.8 Tipos de fugas en tubería	61
Ilustración 2.9 Correlador localizador de fugas	63
Ilustración 2.10 Geófono localizador de fugas	63
Ilustración 2.11 Rango de diámetros de tubería que determinan si los métodos de rehabilitación son efectivos	64
Ilustración 3.1 Ejemplo de trazo de una red de abastecimiento	75
Ilustración 3.2 Ejemplo de zonas de influencia de fuentes de abastecimiento	75
Ilustración 3.3 Ejemplo de zonas y horarios de servicio de agua	75
Ilustración 3.4 Ejemplo de un levantamiento de fontanería de tanques	76
Ilustración 3.5 Ejemplo de definición de zonas de servicio de agua	79
Ilustración 3.6 Ejemplo de un sector con un punto de alimentación y red secundaria convencional	88
Ilustración 3.7 Ejemplo de un sector con un punto de alimentación y red secundaria en subsectores o bloques	88
Ilustración 3.8 Comportamiento típico de una bomba: al disminuir el caudal bombeado se incrementa la presión del flujo en la descarga, además de disminuir notablemente la eficiencia de operación	89
Ilustración 3.9 Ejemplo de un modelo de una red de agua potable	93
Ilustración 3.10 Fases de la modelación de los sistemas hidráulicos a presión	93
Ilustración 3.11 Curva de variación de demanda típica para diversas ciudades de México	96
Ilustración 3.12 Ejemplo de sector con distribución de nodos homogénea	96
Ilustración 3.13 Ejemplo de esquema de entrega de agua en bloque	97
Ilustración 3.14 Ejemplo de aislamiento de conducciones para representar esquema de entrega de agua en bloque	97
Ilustración 3.15 Identificación de límites de sector y definición de puntos de corte	98
Ilustración 3.16 Comprobación de aislamiento de sector	98
Ilustración 3.17 Definición de la carga de diseño para equipos de bombeo	101
Ilustración 3.18 Uso de las válvulas automáticas para regulación del caudal	101
Ilustración 3.19 Función de válvula sostenedora de presión	103
Ilustración 3.20 Análisis del sistema de conducción con entrega directa a red en ruta	103
Ilustración 3.21 Análisis de sistema con representación de la zona de influencia como un nodo de consumo	103
Ilustración 3.22 Ejemplo de diagrama de flechas y ruta crítica	105
Ilustración 3.23 Trabajos de aislamiento de sectores	107
Ilustración 3.24 El apoyo entre sectores deberá planearse en el esquema de entrega de agua en bloque	107
Ilustración 4.1 Equipo de bombeo con eficiencia baja	110

Ilustración 4.2 Cada fuga en el sistema de distribución de agua provoca una disminución en la carga hidráulica del sistema de bombeo	111
Ilustración 4.3 Esquema de una red de distribución típica en México con servicio de agua discontinuo (las zonas coloreadas indican diferentes horarios de suministro a lo largo del día y de la semana)	112
Ilustración 4.4 Fugas típicas en redes de agua	113
Ilustración 4.5 Esquema secuencial del proyecto de eficiencia integral	114
Ilustración 4.6 Comportamiento del volumen almacenado y demandado de un tanque en un paro en hora punta	120
Ilustración 4.7 Volumen demandado en un día, a) con suministro continuo y b) con paro en hora punta	121



TABLAS

Tabla 1.1 Información general que recopila el organismo operador	1
Tabla 1.2 Información que recopila el área técnica del organismo operador	2
Tabla 1.3 Información que recopila el área comercial del organismo operador	2
Tabla 1.4 Información que recopila el área institucional del organismo operador	3
Tabla 1.5 Información que recopila el área operativa del organismo operador	3
Tabla 1.6 Descripción de la campaña de medición	4
Tabla 1.7 Errores permisibles de acuerdo con el gasto estandar (NOM-012-SCFI-1994)	12
Tabla 1.8 Costo del estudio con respecto al nivel de confianza esperado	14
Tabla 1.9 Resumen de inspección de cajas de válvulas	18
Tabla 1.10 Proceso de cálculo para la carga hidráulica de bombeo (Hb) y parámetros a medir	30
Tabla 1.11 Formato para el registro de datos nominales y características del sistema electromecánico	31
Tabla 1.12 Reporte de pruebas de campo de acuerdo con la NOM 006 ENER 1995	32
Tabla 1.13 Consolidado de mediciones para curvas Q-Hb- η_b en un organismo operador	33
Tabla 2.1 Ejemplo de volúmenes de agua producida en un sistema de abastecimiento urbano	39
Tabla 2.2 Ejemplos de consumos medidos autorizados sin corregir (m ³)	40
Tabla 2.3 Ejemplo de estadísticas de consumos de usuarios con cuota fija	41
Tabla 2.4 Ejemplo de de registro de pérdidas por usos, fraudulentos y clandestinos regularizados	44
Tabla 2.5 Ejemplo de concentrado de fugas identificadas y eliminadas	45
Tabla 2.6 Ejemplo de cálculo de volúmenes de fugas reducibles	48
Tabla 2.7 Cálculo de beneficios de reducción de fugas en el ahorro de energía eléctrica	49
Tabla 2.8 Ficha de mantenimiento de la red de distribución. (Localización, reparación y estadísticas de fugas)	54
Tabla 2.9 Ejemplo de la estructura de un área de nueva creación para el control de fugas	59
Tabla 2.10 Secuencia de actividades para implementar un programa de detección de fugas (modificado de CONAGUA, 2009)	68
Tabla 3.1 Promedio del consumo de agua potable estimado por clima predominante	70
Tabla 3.2 Promedio del consumo de agua potable estimado según nivel socioeconómico y clima	70
Tabla 3.3 Ejemplo de formato de disponibilidad de agua por zona de servicio actual	80
Tabla 3.4 Ejemplo de formato de distribución espacial de usuarios	81
Tabla 3.5 Ejemplo de formato de balance volumétrico	82

Tabla 3.6 Ejemplo de formato de redistribución de caudales	91
Tabla 4.1 Problemas operativos típicos y sus consecuencias en el consumo energético	118
Tabla 4.2 Ejemplo del formato para el cálculo de capacidad de regulación requerida con paro en hora punta	122
Tabla 4.3 Formato para el cálculo de la demanda facturable promedio actual	122
Tabla 4.4 Formato para especificar equipos que tendrán cambios en la carga y el gasto	125
Tabla 4.5 Formato para el cálculo de ahorros energéticos por cambio en condiciones de operación	125
Tabla 4.6 Formato para identificar sectores de operación donde es viable el variador de velocidad	127
Tabla 4.7 Formato de requerimientos de sectores	127
Tabla 4.8 Ejemplo de cálculo de energía anual consumida en hora punta, media y base	128
Tabla 4.9 Ejemplo de cálculo de energía anual consumida en diferentes periodos	129
Tabla 4.10 Formato de resumen de ahorros de energía derivados del proyecto integral	132

