

MANUAL PARA UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA INTEGRAL EN UN SISTEMA DE AGUA Y SANEAMIENTO

MEXICO LOW EMISSIONS DEVELOPMENT PROGRAM (MLED).

CONTRACT: MLED GRANT 002 (US0397-PO-13-0295)

MITIGACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR EL EXCESIVO CONSUMO DE ENERGÍA UTILIZADO EN EL SUMINISTRO DE AGUA A LAS POBLACIONES, A TRAVÉS DEL USO EFICIENTE DE LA MISMA

ESTE INFORME FUE ELABORADO POR TETRA TECH ES INC. PARA LA AGENCIA DE LOS ESTADOS UNIDOS PARA EL DESARROLLO INTERNACIONAL.

AVISO LEGAL

LAS OPINIONES EXPRESADAS EN ESTA PUBLICACIÓN NO REFLEJAN NECESARIAMENTE LA OPINIÓN DE LA AGENCIA DE LOS ESTADOS UNIDOS PARA EL DESARROLLO INTERNACIONAL NI LA DEL GOBIERNO DE LOS ESTADOS UNIDOS.

MANUAL PARA UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA INTEGRAL EN UN SISTEMA DE AGUA Y SANEAMIENTO

El presente documento fue elaborado por Watergy México A.C. El autor principal es José Arturo Pedraza Martínez, bajo la supervisión del Ing. Arturo Romero Paredes Rubio de Tetra Tech ES Inc. en el marco del Programa para el Desarrollo Bajo en Emisiones de México (MLED), patrocinado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), bajo el contrato “MLED GRANT 002 (US0397-PO-13-0295)” implementado por Tetra Tech ES Inc.

Para mayor información, por favor contacte a: info@mledprogram.org

www.mledprogram.org



MANUAL PARA UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA INTEGRAL EN UN SISTEMA DE AGUA Y SANEAMIENTO



CONTENIDO

1	Acrónimos y Glosario de Términos	19
1.1	Acrónimos y Unidades	19
1.2	Glosario de Términos	25
2	Antecedentes y Objetivos	30
2.1	Antecedentes del Manual	30
2.2	Objetivos del Manual	30
3	Resumen Ejecutivo.....	32
4	Introducción	35
5	Justificación	38
6	Proyectos de eficiencia integral	40
6.1	La evolución de los enfoques de eficiencia física, hidráulica y energética	40
6.2	Estructura del proyecto de eficiencia integral	44
6.2.1	Trabajos preliminares	45
6.2.2	Evaluación física y generación de datos básicos	45
6.2.3	Evaluación de la disponibilidad de agua	45
6.2.4	Desarrollo del Proyecto de Eficiencia Hidráulica.....	46
6.2.5	Elaboración del proyecto de eficiencia energética	48
6.2.6	Cálculo de indicadores de evaluación	49
6.2.7	Puesta en marcha de los sectores hidráulicos y reducción de pérdidas de agua	49
6.3	Medidas de Ahorro de Energía Resultantes de la Optimización de la Operación Hidráulica	50
6.3.1	Operación fuera de hora punta de equipos de bombeo	51
6.3.2	Cambio de condiciones de carga y gasto en equipos de bombeo	56
6.3.3	Aplicación de velocidad variable en equipos que inyectan directo a la red	59
6.3.4	Paro definitivo de equipos como resultado de un programa de reducción de fugas	63
6.3.5	Cuantificación de ahorros de energía totales.....	64

6.4	Proyectos de eficiencia integral aplicados en México	66
6.4.1	Obtención de datos básicos y descripción de sistemas.....	66
6.4.2	Disponibilidad de agua	67
6.4.3	Eficiencia hidráulica	68
6.4.4	Eficiencia Energética.....	69
7	Generación de datos básicos	72
7.1	Recopilación y análisis de Información	72
7.2	Campaña de medición.....	76
7.2.1	Campaña de Medición Hidráulica.....	79
7.2.1.1	<i>Medición de presiones en la red</i>	<i>79</i>
7.2.1.2	<i>Medición de caudales suministrados.....</i>	<i>79</i>
7.2.1.3	<i>Medición de variación de la demanda de agua en la red.....</i>	<i>80</i>
7.2.1.4	<i>Medición de errores de exactitud en macromedidores</i>	<i>81</i>
7.2.1.5	<i>Muestreo de consumos de cuota fija.....</i>	<i>82</i>
7.2.1.5.1	Muestreo de consumos históricos de facturación en tomas con micromedidor	83
7.2.1.5.2	Muestreo de registros de consumos en campo en micromedidores existentes	84
7.2.1.5.3	Muestreo de registros de campo en micromedidores nuevos calibrados.....	84
7.2.1.6	<i>Muestreo de errores de exactitud de micromedidores.....</i>	<i>84</i>
7.2.1.7	<i>Muestreo de ocurrencia de fugas</i>	<i>87</i>
7.2.1.7.1	Evaluación de fugas en tomas domiciliarias (Vol _{ftd})	88
7.2.1.7.2	Evaluación de fugas en cajas de válvulas	90
7.2.1.7.3	Evaluación de fugas en tuberías principales y secundarias.....	91
7.2.1.8	<i>Levantamiento de cajas de válvulas</i>	<i>91</i>
7.2.1.9	<i>Levantamientos topográficos</i>	<i>94</i>
7.2.1.10	<i>Vinculación de tomas domiciliarias.</i>	<i>94</i>
7.2.2	Campaña de medición electromecánica de parámetros eléctricos e hidráulicos en equipos de bombeo. 96	
7.2.2.1	<i>Medición de parámetros eléctricos.....</i>	<i>96</i>
7.2.2.2	<i>Medición de tensión eléctrica (Voltaje)</i>	<i>97</i>
7.2.2.3	<i>Medición de corriente eléctrica</i>	<i>97</i>
7.2.2.4	<i>Potencia real o activa.....</i>	<i>98</i>
7.2.2.5	<i>Medición del Factor de Potencia.....</i>	<i>99</i>
7.2.2.6	<i>Medición de parámetros hidráulicos</i>	<i>100</i>

MANUAL PARA UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA INTEGRAL EN UN SISTEMA DE AGUA Y SANEAMIENTO

7.2.2.6.1	Medición del caudal a la descarga de la bomba.....	101
7.2.2.6.2	Medición de cargas de presión de succión y descarga.....	101
7.2.2.6.3	Definición del nivel de referencia.....	101
7.2.2.6.4	Medición del nivel dinámico de succión	102
7.2.2.6.5	Medición de niveles a centros de manómetros	105
7.2.2.7	<i>Determinación de la carga hidráulica de bombeo.....</i>	<i>105</i>
7.2.2.8	<i>Formatos de registro de datos en campo</i>	<i>106</i>
7.2.2.9	<i>Elaboración de curvas de operación de equipos de bombeo.....</i>	<i>111</i>
7.2.3	Estado de instalaciones eléctricas, sistemas de puesta a tierra y de mantenimiento eléctrico y mecánico.....	114
7.2.3.1	<i>Medición de temperatura en componentes de conexión y equipos electromecánicos</i>	<i>114</i>
7.2.3.2	<i>Medición de temperatura en el equipo de control</i>	<i>115</i>
7.2.3.3	<i>Medición de temperatura en el motor.....</i>	<i>115</i>
7.2.3.4	<i>Medición de temperatura en el transformador.....</i>	<i>115</i>
7.2.3.5	<i>Medición de resistencia de puesta a tierra en elementos físicos y eléctricos del sistema de puesta a tierra.....</i>	<i>116</i>
7.2.3.6	<i>Inspección de instalaciones eléctricas y mecánicas.....</i>	<i>117</i>
7.2.3.7	<i>Medición de velocidad angular (rpm) en motores externos.</i>	<i>120</i>
7.2.3.8	<i>Aplicación de las rpm para obtener la potencia real entregada en la flecha de un motor</i> <i>121</i>	<i>121</i>
7.2.4	Estado de mantenimiento y capacidad de producción de pozos.....	122
7.2.4.1	<i>Medición de nivel estático y elaboración de la curva de abatimiento del pozo</i>	<i>122</i>
7.2.4.2	<i>Inspección del estado de los elementos que conforman el pozo.</i>	<i>124</i>

8 Eficiencia física..... 128

8.1	Diagnóstico de eficiencia física	128
8.1.1	Hoja de cálculo, periodo de análisis y unidad de medida	131
8.1.2	Tarea 1. Cuantificación del suministro de agua.....	131
8.1.2.1	<i>Volúmenes de producción no-registrados</i>	<i>131</i>
8.1.2.2	<i>Corrección de volúmenes de producción por inexactitud de macromedidores instalados</i> <i>132</i>	<i>132</i>
8.1.2.3	<i>Corrección de volúmenes de producción por cambio de reservas en tanques</i>	<i>132</i>
8.1.3	Tarea 2. Estimación de consumos medidos autorizados.....	133
8.1.4	Tarea 3. Estimación de consumos no-medidos autorizados	133
8.1.5	Tarea 4. Cálculo de pérdidas identificadas y eliminadas.....	134

MANUAL PARA UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA INTEGRAL EN UN SISTEMA DE AGUA Y SANEAMIENTO

8.1.5.1	<i>Consumo de agua por errores de exactitud en los micromedidores.....</i>	<i>134</i>
8.1.5.2	<i>Consumo de agua por desfase en periodos de lectura de medidores.....</i>	<i>135</i>
8.1.5.3	<i>Consumo de agua de usuarios fraudulentos y clandestinos regularizados</i>	<i>136</i>
8.1.5.4	<i>Volumen de fugas reparadas</i>	<i>137</i>
8.1.5.5	<i>Consumo de agua por errores en asignación de cuotas fijas.....</i>	<i>138</i>
8.1.6	Tarea 5. Estimación de pérdidas potenciales totales	139
8.1.7	Pérdidas reducibles y acciones	140
8.1.8	Beneficios de la reducción de fugas	141
8.1.8.1	<i>Beneficios por ahorro de energía eléctrica por reducción de fugas.....</i>	<i>142</i>
8.1.8.2	<i>Beneficios por ahorro de potabilización por reducción de fugas.....</i>	<i>142</i>
8.1.9	Costo y tiempo de la reducción y control de fugas	142
8.2	Proyecto de eficiencia física.....	143
8.2.1	Elaboración de diagnóstico de la situación actual de fugas	144
8.2.2	Identificación de causas que originan el estado actual de fugas	144
8.2.2.1	<i>Obtención del nivel actual de fugas y causas físicas.....</i>	<i>145</i>
8.2.2.2	<i>Evaluación del estado actual de los subproyectos asociados al control de fugas.....</i>	<i>146</i>
8.2.2.3	<i>Formulación de árboles de problemas de fugas</i>	<i>149</i>
8.2.3	Diseño de medidas preventivas y facilitadoras de la reducción y control de fugas.....	151
8.2.4	Definición de acciones para la eliminación intensiva de fugas para alcanzar un nivel aceptable	154
8.2.4.1	<i>Origen de las fugas y técnicas de localización y reparación</i>	<i>154</i>
8.2.4.2	<i>Procedimiento para localización y reparación de fugas en tomas domiciliarias.....</i>	<i>158</i>
8.2.4.3	<i>Localización y reparación de fugas en cajas de válvulas</i>	<i>158</i>
8.2.4.4	<i>Localización y reparación de fugas en tuberías principales y secundarias, y en tanques</i>	<i>159</i>
8.2.5	Diseño del programa permanente de control de fugas para mantener un nivel aceptable.....	160
8.2.6	Estimación de costos, calendarización y esquema de financiamiento.....	161
9	Eficiencia hidráulica	164
9.1	Diagnóstico de eficiencia hidráulica.....	164
9.1.1	Evaluación de Eficiencia Hidráulica por medio de indicadores generales	164
9.1.1.1	<i>Consumo unitario de los usuarios</i>	<i>164</i>
9.1.1.2	<i>Dotación.....</i>	<i>166</i>
9.1.1.3	<i>Continuidad del servicio de agua</i>	<i>166</i>
9.1.1.4	<i>Déficit entre el caudal de agua disponible en la red y el caudal de agua requerido por los usuarios</i>	<i>166</i>

MANUAL PARA UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA INTEGRAL EN UN SISTEMA DE AGUA Y SANEAMIENTO

9.1.1.5	<i>Presión media del agua en la red de distribución</i>	167
9.1.2	Elaboración del diagnóstico de eficiencia hidráulica.....	168
9.1.2.1	<i>Estado físico y la capacidad de producción de las fuentes de abastecimiento</i>	168
9.1.2.1.1	Diagnóstico del estado físico de los elementos que conforman la fuente de abastecimiento	168
9.1.3	Diagnóstico de la capacidad de producción de la fuente de abastecimiento	170
9.1.3.1	<i>Características de la población</i>	173
9.1.3.2	<i>Descripción del sistema y su operación</i>	173
9.1.3.3	<i>Actualización de los planos de la red</i>	174
9.1.3.4	<i>Cálculo de consumos, dotación y gastos de operación</i>	178
9.1.3.5	<i>Cálculo del balance volumétrico de la red actual</i>	179
9.2	Proyecto de Eficiencia Hidráulica.....	184
9.2.1	Conformación de sectores para redistribución de caudales y presiones en la red	185
9.2.1.1	<i>Consideraciones para la propuesta de sectores</i>	185
9.2.1.2	<i>Redistribución de caudales en el sistema</i>	185
9.2.1.3	<i>Análisis de la capacidad de regulación de tanques por sector</i>	187
9.2.2	Elaboración del modelo de simulación hidráulica de la red	187
9.2.3	Análisis hidráulico de la red sectorizada	191
9.2.3.1	<i>Definición de condiciones generales de análisis</i>	191
9.2.3.1.1	Período del análisis.....	191
9.2.3.1.2	Demanda base por nodo	192
9.2.4	Representación del esquema de sectorización	193
9.2.4.1	<i>Optimización del funcionamiento hidráulico de la red de distribución</i>	196
9.2.4.1.1	Control de presiones bajas	196
9.2.4.1.2	Control de presiones altas.....	196
9.2.5	Análisis hidráulico de las conducciones para entrega de agua en bloque	196
9.2.5.1	<i>Análisis hidráulico en flujo permanente de las conducciones</i>	197
9.2.5.1.1	Diseño de equipos de bombeo.....	197
9.2.5.1.2	Uso de válvulas de control automático	197
9.2.5.1.3	Control de velocidades y presiones.....	198
9.2.5.2	<i>Análisis hidráulico periodos extendidos de las conducciones</i>	198
9.2.6	Estrategias para la puesta en marcha del proyecto de sectorización	200
9.2.6.1	<i>Programa de construcción, instrumentación y saturación de sectores</i>	200

9.2.6.2	<i>Construcción de sectores hidráulicos</i>	202
9.2.6.3	<i>Instrumentación de sectores hidráulicos</i>	203

10 Eficiencia energética 206

10.1	Diagnóstico de eficiencia energética	206
10.1.1	Principios fundamentales de un Diagnóstico de Eficiencia Energética.	206
10.1.1.1	<i>Balance General de Energía en un sistema de abastecimiento de agua potable y saneamiento.</i>	206
10.1.1.2	<i>Pérdidas energéticas en sistemas de bombeo, (Balance de Energía en un sistema de bombeo)</i> 209	
10.1.2	Metodología para elaborar un DEE	211
10.1.3	Diagnóstico del Sistema Eléctrico.....	213
10.1.3.1	<i>Evaluación de cumplimiento de las instalaciones eléctricas y sistemas de puesta a tierra.</i> 213	
10.1.3.2	<i>Análisis de la calidad de la energía</i>	217
10.1.3.3	<i>Análisis de calidad de la energía sin contar con analizador de circuitos eléctricos.</i> ...	222
10.1.3.4	<i>Análisis del Factor de Potencia</i>	224
10.1.3.5	<i>Evaluación de conductores eléctricos</i>	225
10.1.4	Diagnóstico energético de motores eléctricos	228
10.1.4.1	<i>Evaluación de eficiencia de motores</i>	229
10.1.4.2	<i>Análisis de resultados de la eficiencia de motor</i>	231
10.1.5	Diagnóstico energético de la bomba.....	232
10.1.5.1	<i>Pérdidas típicas en bombas</i>	232
10.1.5.2	<i>Evaluación de eficiencias de la bomba y electromecánica</i>	233
10.1.5.3	<i>Análisis e interpretación de los valores de eficiencia electromecánica diagnosticada</i>	235
10.1.5.4	<i>Análisis de las condiciones de operación de los equipos de bombeo</i>	236
10.1.6	Diagnóstico energético en el sistema de conducción y distribución de agua.....	238
10.1.6.1	<i>Problemas típicos en sistemas de conducción</i>	238
10.1.6.2	<i>Pérdidas de carga hidráulica en los sistemas de conducción</i>	240
10.1.7	Aspectos de mantenimiento de las instalaciones electromecánicas a observar en el DEE	241
10.1.8	Elaboración de balances de energía de equipos de bombeo.....	242
10.2	Proyecto de eficiencia energética.....	243
10.2.1	Metodología para elaborar el Proyecto de Eficiencia Energética (PEE) y determinación de medidas de ahorro.....	243
10.2.2	Medidas de optimización del consumo energético.....	246

10.2.2.1	<i>Optimización de la Eficiencia Electromecánica</i>	247
10.2.2.1.1	Adecuación del equipo de bombeo al punto de operación real.....	247
10.2.2.1.2	Ajuste de la posición de los impulsores en bombas de turbina con impulsor abierto ...	248
10.2.2.1.3	Optimización de la eficiencia del motor.....	251
10.2.2.1.4	Corregir los desbalances de tensión.....	253
10.2.2.1.5	Sustitución del motor eléctrico por un motor de alta eficiencia	254
10.2.2.1.6	Sustitución del conjunto Bomba - Motor.....	255
10.2.2.2	<i>Mantenimiento preventivo y predictivo</i>	257
10.2.2.3	<i>Optimización de cargas de bombeo</i>	259
10.2.2.3.1	Corrección de defectos en la configuración de tuberías de descarga y en la operación	259
10.2.2.3.2	Reducción de pérdidas por cortante en conducciones	259
10.2.2.4	<i>Control de Presiones y Caudales</i>	260
10.2.2.4.1	Instalación de variadores de frecuencia.....	260
10.2.2.4.2	Instalación de tanques de regulación.....	263
10.2.2.5	<i>Optimización de instalaciones eléctricas</i>	264
10.2.2.5.1	Optimización del factor de potencia (FP).....	264
10.2.2.5.2	Adecuación de calibres de conductores.....	266
10.2.2.5.3	Reducción de pérdidas en transformadores	267
10.2.3	Medidas que reducen el costo energético	269
10.2.3.1	<i>Selección de la estructura tarifaria</i>	269
10.2.3.2	<i>Control de la demanda en hora punta</i>	270
10.2.4	Evaluación económica de las medidas de ahorro de energía y reducción de costos	271
10.2.5	Elaboración del reporte final del proyecto de eficiencia energética	272
10.2.6	Medidas de ahorro de energía complementarias	273
10.2.6.1	<i>Medidas resultantes de la optimización de la operación hidráulica</i>	273
10.2.6.2	<i>Medidas resultantes del ahorro de agua y optimización de procesos del lado de la demanda y el saneamiento</i>	274
11	Indicadores de eficiencia	276
11.1	Indicador Energético IE, (Kwh/m ³).....	277
11.2	Indicador de Costo Unitario de Energía CUE, (\$/kWh)	277
11.3	Indicador de eficiencia física, IEF, (%)	278
11.4	Dotación promedio por habitante, Dp, (Lt/hab/día)	278

11.5	Indicador de continuidad en el servicio, ICS, (Horas).....	279
12	ANEXOS.....	281
12.1	Anexo A. Formatos para recopilación de información y datos.....	281
12.2	Anexo B. Propiedades hidráulicas y medición	295
12.3	Anexo C. Formato del balance de agua	297
12.4	Anexo D. Estructura tarifaria	298
12.5	Anexo E. Tablas y gráficas de referencia electromecánica	308
12.5.1	Anexo E.1. Tablas y graficas de referencia en el diagnóstico y proyecto de eficiencia energética. 308	
12.5.2	Anexo E.2 Cálculos Eléctricos e Hidráulicos.....	312

Índice de Figuras por orden de aparición

Ilustración 2	Equipo de bombeo con eficiencia baja	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 4	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)	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 5	Fugas típicas de agua en redes de agua potable.....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 7	Procedimiento para la definición final del Proyecto de Eficiencia Hidráulica	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 8	Comportamiento del volumen almacenado y demandado en un tanque con paro en hora punta	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 10	Medición de presiones en la red.....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 12	Curva típica de variación de la demanda de agua en una red de agua potable.....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 14	Equipo utilizado en pruebas de exactitud de micromedidores	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 16	Prueba en campo de exactitud de micromedidores.....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 17	Ficha técnica tipo de inspección de caja de válvulas	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 19	Medición de tensión (voltaje) en equipos de bombeo ..	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 20	Medición de corriente eléctrica en equipos de bombeo	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 22	Medición de la potencia real después de los capacitores	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 24	Medición de niveles en caso de tener únicamente manómetro en la descarga.....	102
Ilustración 25	Medición de niveles en caso de contar con manómetros en succión y descarga	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 27	Especificación para la instalación de una Sonda Neumática en pozos profundos. .	Error! Bookmark not defined.

Ilustración 29 EJEMPLO DE INSTALACIÓN DE SONDA NEUMÁTICA EN POZOS PROFUNDOS	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 30 Curvas reales H-Q en pozos de un organismo operador. (Ejemplo).....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 32 Esquema descriptivo de medición de resistencia de la red de tierras.....	117
Ilustración 33 Ejemplo de tacómetro fotoeléctrico y de contacto.	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 34 Ejemplo de la curva de abatimiento de un pozo.....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 35 Estructura estándar del Balance de Agua.	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 37.....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 38 Bloques de actividades para elaborar un proyecto de eficiencia física.....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 40 Ejemplo de un esquema gráfico de interrelación de los departamentos de un organismo operador con el proceso de control de fugas.....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 41 Ejemplo típico de un árbol de problemas de fugas.....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 43 Diagrama de diseño de subproyectos básicos para el control de fugas	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 44 Clasificación de fugas en sistemas de agua potable	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 45 Tipos de fugas en tuberías	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 47 Geófono localizador de fugas	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 48 Rango de diámetros de tubería donde los métodos de rehabilitación son efectivos.....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 49 Análisis del beneficio – costo de un programa de control de fugas.....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 50 Comportamiento típico de curvas de abatimiento en pozos profundos.....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 52 Ejemplo de zonas de influencia de fuentes de abastecimiento.....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 53 Ejemplo de zonas y horarios de servicio de agua	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 55 Ejemplo de definición de zonas de servicio.....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 56 Ejemplo de un modelo de una red de agua potable	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 58 Curva de variación de la demanda típica (Fuente: CONAGUA).....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 60 Ejemplo de esquema de entrega de agua en bloque	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 61 Ejemplo de aislamiento de conducciones para representar esquema de entrega de agua en bloque	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 63 Comprobación de aislamiento de sector	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 65 Uso de válvulas automáticas para la regulación de caudal.....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 66 Función de válvula sostenedora de presión	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 68 Análisis de sistema con representación de la zona de influencia como un nodo de consumo.....	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 69 Ejemplo de diagrama de flechas y ruta crítica	201
Ilustración 71 El apoyo entre sectores deberá planearse en el esquema de entrega de agua en bloque	Error! Bookmark not defined.
Ilustración 72 Descripción gráfica del balance general de energía en un sistema de abastecimiento de agua potable y saneamiento.	Error! Bookmark not defined.

Ilustración 73 Esquema de un Sistema Típico de Suministro y Consumo Energético en Sistemas de Agua Potable y Saneamiento.....**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 75 Metodología para realizar un DEE en Sistemas de Agua Potable y Saneamiento ..**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 76 Ejemplos de anomalías más comunes en instalaciones eléctricas.**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 77 Ejemplos de anomalías más comunes en instalaciones eléctricas.**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 78 Esquema de interconexión del sistema de puesta a tierra en un sistema trifásico, con las componentes de las instalaciones.....**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 80 Ejemplo de gráfico de comportamiento de tensión eléctrica.**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 82 Ejemplo de gráfico de Potencia Activa.....**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 84 Ejemplo de gráfico de forma de onda de tensión y corriente.**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 85 Diagrama esquemático de las eficiencias que integran la eficiencia electromecánica**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 86 Diagrama esquemático de los problemas que se presentan al operar las bombas fuera de su punto óptimo.....**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 88 Arreglo típico de bombas centrífugas operadas en paralelo**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 89 Características de carga-capacidad de bombas centrífugas operadas en paralelo ...**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 90 Efecto de la operación de varias bombas en paralelo con respecto al sistema de conducción.....**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 91 Problemas trópicos de falta de mantenimiento en equipos de bombeo**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 93 Metodología para desarrollar un PEE en Sistemas de Agua Potable y Saneamiento**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 94 Integración del Proyecto de Ahorro de Energía**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 95 Diagrama de una bomba de turbina de flecha de impulsor abierto y sus componentes**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 97 Curvas típica de dos equipos de bombeo con curvas H-Q diferentes.**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 99 Medición en campo de nivel de vibraciones en un sistema de bombeo.....**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 100 B.1. Curva típica de exactitud de medidores de agua potable**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 101 B.2. Distancias para ubicar un medidor electromagnético y obtener mediciones confiables**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 103 D.2. Cargo por factor de potencia menor a 90%**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 104 D.3. Bonificación por alto factor de potencia, mayor al 90%**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 105 E.1 Eficiencia típica vs. curvas de carga para motores de inducción de jaula de diseño B, 1800 RPM.....**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 106 E.2 Depreciación de la eficiencia de un motor en función de la desviación del voltaje respecto al nominal.....**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 107 E.3 Depreciación de la eficiencia de un motor en función del desbalance de voltaje**Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 109 E.5 Factor de Potencia como función del factor de carga en un motor **Error! Bookmark not defined.**

Ilustración 110 E.6. Cálculo del calibre óptimo del ejemplo.....**Error! Bookmark not defined.**

Índice de Tablas por orden de aparición

Tabla 1 Problemas operativos típicos y sus consecuencias en el consumo energético..... 50

Tabla 2 Ejemplo del formato para el cálculo de capacidad de regulación requerida con paro en hora . 53

Tabla 3 Formato para el cálculo de la demanda facturable promedio actual..... 54

Tabla 4 Formato para especificar equipos que tendrán cambios en la carga (mca) y el gasto de operación propuesta..... 57

Tabla 5 Formato para el cálculo de ahorros energéticos por cambio en condiciones de operación. 58

Tabla 6 Formato para identificar sectores de operación donde es viable el variador de velocidad 59

Tabla 7 Formato de requerimientos de sectores 60

Tabla 8 Ejemplo de cálculo de energía anual consumida en hora punta, media y base..... 61

Tabla 9 Ejemplo de cálculo de energía anual consumida en diferentes periodos..... 62

Tabla 10 Formato de resumen de ahorros de energía derivados del proyecto integral..... 65

Tabla 11 Eficiencia física en proyectos realizados 67

Tabla 12 Ahorro de energía por reducción de fugas al 20% en ciudades..... 67

Tabla 13 Desequilibrios volumétricos en ciudades estudiadas..... 68

Tabla 14 Potencial de equilibrio volumétrico en ciudades estudiadas 69

Tabla 15 Características de los modelos de simulación creados..... 69

Tabla 17. Información general a recopilar del organismo operador..... 72

Tabla 19 Información a recopilar del área comercial del organismo operador..... 74

Tabla 20 Información a recopilar del área operativa del organismo operador..... 75

Tabla 21 Información a recopilar del área institucional del organismo operador..... 76

Tabla 22 Descripción de la campaña de medición 78

Tabla 23 Costo del estudio con respecto al nivel de confianza esperado 89

Tabla 24 94

Tabla 25 Proceso de cálculo para la carga hidráulica de bombeo (Hb) y parámetros a medir..... 106

Tabla 26 Formato para el registro de datos nominales y características del sistema electromecánico 107

Tabla 27 Formato para el registro de mediciones de variables hidráulicas y eléctricas de equipos de bombeo..... 108

Tabla 29 Formato B. Reporte de pruebas en campo de la NOM-006-ENER-1995 110

Tabla 30 Consolidado de mediciones para curvas Q-Hb- η_b en un organismo operador..... 112

Tabla 31 Formato de registro de mediciones de resistencia en los sistemas de puesta a tierra..... 117

Tabla 33 Listado para la inspección de instalaciones mecánicas..... 120

Tabla 34 Velocidad de sincronismo en motores de 60 Hz de acuerdo a los polos del motor..... 121

Tabla 35 Tabla de cálculo para construcción de la curva de abatimiento de un pozo 123

Tabla 36 Listado de puntos a inspeccionar en las componentes de un pozo profundo 126

MANUAL PARA UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA INTEGRAL EN UN SISTEMA DE AGUA Y SANEAMIENTO

Tabla 37 Ejemplo de volúmenes de agua producida en un sistema de abastecimiento urbano	131
Tabla 38 Ejemplo de consumos medidos autorizados sin corregir (m3)	133
Tabla 39 Ejemplo de consumos de usuarios con cuota fija.	133
Tabla 40 Ejemplo de pérdidas por usos y fraudulentos y clandestinos regularizados.	137
Tabla 41 Ejemplo de fugas identificadas y eliminadas	138
Tabla 42 Ejemplo del cálculo de volúmenes de fugas reducibles.....	141
Tabla 43 Cálculo de beneficios de reducción de fugas en el ahorro de energía eléctrica	142
Tabla 44 Ficha de mantenimiento de la red de distribución (localización, reparación y estadísticas de fugas)	148
Tabla 45 Ejemplo de la estructura de un área de nueva creación para el control de fugas.....	153
Tabla 46 Secuencia de actividades para implementar un programa de control de fugas	161
Tabla 47 Consumo unitario doméstico, CONAGUA.....	165
Tabla 48 Clasificación de clima de localidades mexicanas, CONAGUA.....	165
Tabla 49 Ejemplo de formato de disponibilidad de agua por zona de servicio actual.....	181
Tabla 50 Ejemplo de formato de distribución espacial de usuarios	182
Tabla 51 Ejemplo de formato de balance volumétrico.....	183
Tabla 52 Ejemplo de formato de balance volumétrico (continuación).....	183
Tabla 53 Ejemplo de formato de redistribución de caudales.....	186
Tabla 54 Etapas y tipo de operación de consumo de energía en un sistema de agua potable y saneamiento	208
Tabla 55 Resistencia a la corriente continua para diferentes calibres de conductor de cobre sin estañar a 75°C	226
Tabla 56 Resumen del resultado de cálculo de pérdidas en conductores de acuerdo al ejemplo.	228
Tabla 58 Depreciación de la eficiencia de un motor rebobinado en función de la temperatura utilizada	230
Tabla 59 Condiciones de operación ineficiente de los motores eléctricos	232
Tabla 60 Valores mínimos de eficiencia electromecánica con base en la NOM 006 ENER-1995.....	236
Tabla 61 Casos típicos de operación fuera de su diseño original.....	238
Tabla 62 Principales medidas de ahorro de energía a evaluar	246
Tabla 64 Acciones recomendadas para corregir condiciones de operación ineficiente de los motores eléctricos.....	252
Tabla 65 Acciones recomendadas para corregir el desbalance de voltaje de alimentación a los motores eléctricos.....	253
Tabla 66 Acciones recomendadas para mejorar las condiciones en un transformador	268
Tabla 67 Medidas de ahorro de energía resultantes de la optimización hidráulica	274
Tabla 69 A.1. Formato de campo para levantamiento físico de inspección y aforo de fugas en tomas domiciliarias	293
Tabla 70 A.2. Formato típico para encuestas de verificación de tomas domiciliarias	293
Tabla 71 A.2. Formato típico para encuestas en la verificación de tomas domiciliarias (Continuación)	294
Tabla 72 B.1. Rugosidad en tuberías nuevas	295
Tabla 73 B.2. Factores de incremento de f por envejecimiento de tuberías	295
Tabla 74 B.3. Viscosidad cinemática del agua en función de la temperatura.....	295
Tabla 75 D.1. Formato típico para registrar la estadística de facturación eléctrica.....	308
Tabla 76 E.1 PÉRDIDAS en un transformador eléctrico en función de su capacidad nominal	308
Tabla 77 E.6. Formato de datos para el paro en hora punta de los equipos de bombeo.....	324

Índice de Ecuaciones por orden de aparición

Ecuación 1.....	40
Ecuación 2.....	40
Ecuación 3.....	52
Ecuación 4.....	52
Ecuación 5.....	54
Ecuación 6.....	54
Ecuación 7.....	55
Ecuación 8.....	55
Ecuación 9.....	55
Ecuación 10.....	56
Ecuación 11.....	58
Ecuación 12.....	58
Ecuación 13.....	58
Ecuación 14.....	59
Ecuación 15.....	60
Ecuación 16.....	61
Ecuación 17.....	63
Ecuación 18.....	63
Ecuación 19.....	64
Ecuación 20.....	64
Ecuación 21.....	82
Ecuación 23.....	83
Ecuación 25.....	85
Ecuación 26.....	88
Ecuación 27.....	89
Ecuación 28.....	90
Ecuación 29.....	91
Ecuación 31.....	99
Ecuación 32.....	100
Ecuación 33.....	128
Ecuación 34.....	128
Ecuación 35.....	132
Ecuación 36.....	132
Ecuación 37.....	135
Ecuación 38.....	135
Ecuación 40.....	136
Ecuación 41.....	137
Ecuación 42.....	138
Ecuación 45.....	140

MANUAL PARA UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA INTEGRAL EN UN SISTEMA DE AGUA Y SANEAMIENTO

Ecuación 47	165
Ecuación 48	166
Ecuación 51	167
Ecuación 52	178
Ecuación 54	179
Ecuación 55	183
Ecuación 57	186
Ecuación 58	189
Ecuación 60	192
Ecuación 61	222
Ecuación 62	223
Ecuación 63	223
Ecuación 64	224
Ecuación 65	224
Ecuación 66	225
Ecuación 67	225
Ecuación 68	227
Ecuación 69	229
Ecuación 71	233
Ecuación 72	234
Ecuación 75	241
Ecuación 76	247
Ecuación 78	248
Ecuación 81	255
Ecuación 83	260
Ecuación 84	262
Ecuación 85	262
Ecuación 91	265
Ecuación 94	268
Ecuación 96	277
Ecuación 97	278
Ecuación 98 E1	312
Ecuación 99 E2	313
Ecuación 101 E4	313
Ecuación 103 E6	317
Ecuación 104 E7	317
Ecuación 106 E9	317
Ecuación 107 E10	318
Ecuación 108 E11	318
Ecuación 110 E13	319
Ecuación 112 E15	320
Ecuación 114 e17	320
Ecuación 116 E19	321
Ecuación 118 E21	322
Ecuación 120 E23	322
Ecuación 121 E24	322

MANUAL PARA UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA INTEGRAL EN UN SISTEMA DE AGUA Y SANEAMIENTO

Ecuación 123 R26	323
Ecuación 125 E28.....	323
Ecuación 127 E30.....	323
Ecuación 129 E32.....	325
Ecuación 131 E34.....	325

Capítulo 1

Acrónimos y Glosario de Términos



1 Acrónimos y Glosario de Términos

Las definiciones, términos y simbología que se exhibe enseguida tienen por objeto proporcionar una idea común entre los usuarios del Manual, de tal manera que todos manejen los mismos conceptos.

1.1 Acrónimos y Unidades

Los siguientes símbolos se utilizan en el Manual:

A = Área (m^2 , cm^2)

A\$ = Ahorro económico anual que se obtendrá con la implantación de la medida de ahorro propuesta (\$/año)

AP_{ph_p} = Es la potencia eléctrica a ahorrar en hora punta (kW)

C = Consumo

C_d = Consumo total doméstico diario (l/día)

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

Cap_o = Capacidad requerida del capacitor

C_u = Consumo unitario

C_{u_{cf}} = Consumo unitario de cuota fija asignado (m^3 /mes)

C_{u_d} = Consumo unitario doméstico (l/hab/día)

C_{u_{global}} = Consumo unitario global (m^3 /toma/mes)

C_{u_{nd}} = Consumo unitario no-doméstico

C_{u_i} = Consumo unitario de cada toma "i" de la muestra, en (m^3 /toma/mes)

CP = Caballos de potencia (H.P.)

CEP = Es el costo unitario de la energía de punta según la región tarifaria

CUE = Costo unitario de la energía (\$/kWh)

CVMD = Coeficiente de variación máxima diaria

CVMH = Coeficiente de variación máxima horaria

D_i = Diámetro de la tubería (m)

D_{r-m} = Distancia del nivel de referencia a manómetro (m)

Def_{sar} = Déficit promedio en el caudal de agua disponible en la red y el caudal de agua requerido por los usuarios (\pm %)

Dem = Demanda

Dem_{fa} = Es la demanda facturable promedio actual

Dem_{pa} = Es la demanda máxima en punta promedio

Dem_{ia} = Es la demanda máxima en intermedio promedio

Dem_{ba} = Es la demanda máxima en base promedio

MANUAL PARA UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA INTEGRAL EN UN SISTEMA DE AGUA Y SANEAMIENTO

- Dem_{pia} = Es la demanda máxima en punta e intermedio promedio
- Desb_v = Desbalance de tensión eléctrica entre fases (%)
- Desb_i = Desbalance de corriente eléctrica entre fases (%)
- Desb_{vSN} = Desbalance de tensión suministrada respecto a la nominal (%)
- Dot = Dotación (l/hab/día)
- Dot_{req} = Dotación actual requerida para satisfacer adecuadamente a los usuarios (l/hab/día)
- Err = Error, Error de exactitud (%)
- Err_c = Error esperado en la estimación del consumo unitario (m³/toma/mes)
- Err_{cuf} = Error de consumo unitario en cuota fija (±%)
- Err_{fv} = Error esperado en la estimación, en el porcentaje de cajas con fugas
- Err_{ft} = Error esperado en la estimación de fugas en tomas (%)
- Err_m = Error de exactitud del micromedidor (%)
- Err_{mic} = Error esperado en la estimación de error en micromedidores (%)
- Err_q = Error esperado en la estimación del caudal unitario de fugas en tomas domiciliarias (ml/s)
- Err_{qv} = Error esperado en la estimación del caudal unitario de fugas en cajas de válvulas (ml/s)
- EE_c = Energía eléctrica consumida en el período de medición (kWh)
- EE_{pe} = Energía consumida en punta esperada (kWh/año).
- EE_{pa} = Energía consumida en punta actual (kWh/año)
- FC = Factor de carga
- FP = Factor de potencia
- g = Aceleración de la gravedad en (m/s²)
- H = Carga (m)
- H_b = Carga Hidráulica de bombeo (m)
- H_d = Carga de presión en la descarga (m)
- H_p = Carga dinámica total para el sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta (m)
- H_s = Carga de presión de succión (m)
- H_t = Carga total (m)
- H_v = Carga de velocidad (m)
- h = Pérdidas
- h_{cu} = Pérdidas de cobre a tensión nominal (kW)
- h_{Fe} = Pérdidas en el hierro a tensión nominal (kW)
- h_f = Pérdidas de carga hidráulica por cortante (m)
- h_{fc} = Pérdidas de carga hidráulica por fricción en columna (m)

MANUAL PARA UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA INTEGRAL EN UN SISTEMA DE AGUA Y SANEAMIENTO

- h_{fs} = Pérdidas de carga hidráulica por efecto del cortante más las pérdidas equivalentes por accesorios en la tubería de succión (m)
- h_{fta} = Pérdidas por cortante en la tubería actual (m)
- h_{ftp} = Pérdidas por cortante en la tubería propuesta (m)
- h_{joule} = Pérdidas por efecto joule (Watts)
- h_v = Pérdidas de carga de velocidad (m)
- hr_{ri} = Hora de registro de la lectura i
- $hr_{serv, i}$ = Horas de continuidad del servicio de agua potable de una zona de servicio de la red
- hr_{serv} = Horas promedio de continuidad del servicio de agua de un sistema de agua potable
- h_{tot} = Pérdidas totales (kW)
- I = Corriente eléctrica (Amp)
- I_a = Corriente eléctrica en fase A (Amp)
- I_b = Corriente eléctrica en fase B (Amp)
- I_c = Corriente eléctrica en fase C (Amp)
- I_{cond} = Corriente circulando en el conductor (Amp)
- I_{pt} = Corriente eléctrica promedio de fases (Amp)
- I_{tt} = Corriente eléctrica trifásica total (Amp)
- $Long_c$ = Longitud total del conductor (m)
- $Long_r$ = Longitud total de las tuberías de la red de distribución (km)
- $Long_t$ = Suma de las longitudes de todas las tomas domiciliarias (km)
- m = Número total de captaciones en el sistema de agua potable
- mt = Número total de tanques en el sistema de agua potable
- N_r = Nivel de referencia
- ND = Nivel dinámico (m)
- ND_s = Nivel dinámico de succión de la bomba (m)
- n = Número de revoluciones por minuto (rpm, RPM)
- n_c = Número total de captaciones en el sistema de agua potable
- n_f = Número de fugas reparadas
- n_{hab} = Número de habitantes servidos de la localidad
- n_p = Número de puntos de medición de presión
- n_{serv} = Número de habitantes servidos en el sistema de agua potable
- n_t = Número total de tomas domiciliarias registradas
- n_{tanq} = Número total de tanques en el sistema de agua potable
- n_z = Número total de zonas de servicio de agua potable en una red

MANUAL PARA UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA INTEGRAL EN UN SISTEMA DE AGUA Y SANEAMIENTO

n_a	= Tamaño de la muestra de usuarios con registros históricos en su micromedidor
n_{a_c}	= Tamaño de la muestra para evaluar consumos unitarios
$n_{a_{mic}}$	= Tamaño de muestra para evaluar error de exactitud en micromedidores
p	= Presión (kg/cm ²)
p_d	= Presión de operación en la descarga (kg/cm ²)
p_j	= Presión en la jésimo punto de medición en campo (kg/cm ²)
p_{mr}	= Presión media del agua en la red de distribución (kg/cm ²)
p_{med}	= Presión media en la red de distribución (m.c.a.)
p_{op}	= Presión óptima de operación (kg/cm ²)
p_r	= Presión registrada en el monitoreo (kg/cm ²)
p_s	= Presión de operación en la succión (kg/cm ²)
P	= Potencia (kW)
P_a	= Potencia activa (kW)
P_{act}	= Potencia activa medida (kW)
P_e	= Potencia eléctrica (kW)
P_{edm}	= Potencia eléctrica demandada por el motor (kW)
P_{emb}	= Potencia eléctrica que demanda el conjunto motor-bomba actualmente
P_{ei}	= Potencia eléctrica registrado en la lectura i
P_{ep}	= Potencia eléctrica del Sistema de Bombeo propuesto a parar en hora punta (kW)
P_h	= Potencia hidráulica (kW)
P_m	= Potencia mecánica (kW)
P_{mb}	= Potencia mecánica absorbida por la bomba (HP)
P_n	= Potencia nominal del transformador en evaluación (kVA)
P_r	= Potencia reactiva medida (kVar)
P_s	= Potencia de salida de la bomba (kW)
P_{rt}	= Potencia real considerando todas las cargas alimentadas por el transformador (kW)
P_{transf}	= Potencia eléctrica que demanda el transformador actualmente (kW)
Per_{bal}	= Periodo de análisis del balance (días)
Per_{ri}	= Período de recuperación de la inversión (años)
$\%_{ft}$	= Porcentaje de ocurrencia de fugas en tomas domiciliarias, pre estimado (%)
$\%_{fugas}$	= Porcentaje de fugas potenciales en el sistema de distribución (%)
$\%_{fv}$	= Porcentaje pre estimado de ocurrencia de fugas en cajas de válvulas (%)
$\%_{mic}$	= Porcentaje pre estimado de micromedidores que tienen un error de exactitud fuera del límite máximo admisible (± 2 %)

MANUAL PARA UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA INTEGRAL EN UN SISTEMA DE AGUA Y SANEAMIENTO

- $\%_{z,i}$ = Porcentaje de cobertura de red o tomas domiciliarias de una zona de servicio de la red
- Q = Caudal, flujo o gasto (l/s, m³/s)
- Q_{al} = Caudal unitario de fuga (l/s)
- Q_{bomba} = Gasto de la bomba (m³/s)
- Q_f = Caudal promedio de fugas (mml/s)
- Q_m = Caudal medio registrado en el equipo portátil (l/s)
- $Q_{medidor}$ = Gasto instantáneo registrado en el macromedidor (l/s)
- Q_{medreq} = Gasto medio requerido actual (l/s)
- Q_p = Gasto especificado para el sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta (l/s)
- $Q_{patrón}$ = Gasto instantáneo registrado en el medidor portátil (l/s)
- Q_{req} = Gasto requerido (l/s)
- $Q_{req,i}$ = Caudal requerido por los usuarios en una zona de servicio, i (l/s)
- $Q_{s,i}$ = Caudal de agua suministrado a la red de una zona de servicio, i (l/s)
- Q_{ts} = Caudal total suministrado a toda la red de distribución (l/s)
- Q_v q_v = Flujo volumétrico (m³/s)
- R = Resistencia
- R_c = Resistencia del conductor (Ω)
- R_u = Resistencia real del conductor (Ω/m)
- S = Desviación estándar
- S_c = Desviación estándar del consumo unitario histórico en usuarios con micromedidor (m³/toma/mes)
- S_{qi} = Desviación estándar del gasto de fuga en tomas domiciliarias (ml/s)
- S_{qv} = Desviación estándar del gasto de fuga en cajas de válvulas (ml/s)
- t = Tiempo de operación del sistema (días)
- t_f = Tiempo promedio de permanencia de las fugas, desde el inicio del período del balance de agua hasta ser reparada (días)
- t_{OA} = Tiempo de operación anual de la captación (h/año)
- UMF = Umbral mínimo de fugas (referencia óptima) (m³/toma/día)
- V = Tensión eléctrica trifásica (volts)
- V_{an} = Tensión de la fase A (volts)
- V_{bn} = Tensión de la fase B (volts)
- V_{cn} = Tensión de la fase C (volts)
- V_{prom} = Tensión promedio entre fases (volts)
- VIF = Indicador del volumen de fugas (m³/toma/día)
- Vol_A = Volumen de ajuste por almacenamiento (m³)

MANUAL PARA UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA INTEGRAL EN UN SISTEMA DE AGUA Y SANEAMIENTO

- Vol_{ajtot} = Volumen de consumo de agua ajustado total (m^3)
- Vol_{cons} = Volumen de agua consumida, medida o no que reciben los usuarios en sus tomas (m^3)
- Vol_{epp} = Volumen estimado de pérdidas potenciales totales (m^3)
- Vol_{eprp} = Volumen estimado de pérdidas reales potenciales (m^3)
- Vol_{estap} = Volumen estimado total de agua producida ($m^3/año$)
- Vol_{fat} = Volumen actual de fugas potencial total (m^3)
- Vol_{fcv} = Volumen de fugas en cajas de válvulas (m^3)
- Vol_{fp} = Volumen de consumo de agua ajustado para el final del periodo (m^3)
- Vol_{fpl} = Volumen de fugas que permanecerán latentes (m^3)
- Vol_{fr} = Volumen de fugas reparadas (m^3)
- $Vol_{fr20\%}$ = Volumen de fugas reducibles al 20% (m^3)
- Vol_{ft} = Volumen final en el tanque j (m^3)
- Vol_{ftd} = Volumen de fugas en tomas domiciliarias (m^3)
- Vol_{if} = Volumen de fugas en el sistema (m^3)
- Vol_{ip} = Volumen de consumo de agua ajustado para el inicio del periodo (m^3)
- Vol_{it} = Volumen inicial en el tanque j (m^3)
- Vol_{map} = Volumen de consumo de agua contabilizado en el mes anterior al periodo (m^3)
- Vol_{masc} = Volumen consumido medido total autorizado sin corregir (m^3)
- Vol_{micr} = Volumen de agua registrado por el micromedidor (l)
- $Vol_{Patrón}$ = Volumen registrado en un recipiente certificado (l)
- $Vol_{peridel}$ = Volumen de pérdidas totales identificadas y eliminadas (m^3)
- Vol_{perftd} = Volumen de agua perdido por fugas en tomas domiciliarias (l)
- Vol_{pft} = Volumen de agua perdido por fugas en tuberías principales y secundarias (m^3)
- Vol_{sc} = Volumen de suministrado al sistema en un año corregido (m^3)
- $Vol_{sumministrado}$ = Volumen de agua suministrada a la red (m^3)
- $Vol_{sumacorr}$ = Volumen de suministro total de agua corregido (m^3)
- Vol_{nma} = Volumen consumido total no medido autorizado (m^3)
- Vol_{ucf} = Volumen consumo de agua de usuarios con cuota fija en el período del balance de agua sin corregir (m^3)
- Vol_{ump} = Volumen de consumo de agua contabilizado en el último mes del periodo (m^3).
- Z_c = Valor de la abscisa de la curva de probabilidad normal estandarizada (1.96 para nivel de confianza del 95%)
- Δ = Incremento o disminución
- ρ = Densidad del agua bombeada (kg/m^3)

γ	= Peso específico del agua (kg/m^3)
η_b	= Eficiencia de la bomba (%)
η_{em}	= Eficiencia electromecánica del conjunto motor – bomba (%)
$\eta_{fís}$	= Eficiencia física (%)
η_m	= Eficiencia del motor (%)
η_p	= Eficiencia electromecánica para el sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta (%)
η_{trans}	= Eficiencia actual del transformador (%)

1.2 Glosario de Términos

Aforo.- Medición del caudal o gasto.

Aqua potable.- Líquido incoloro, insípido e inodoro que se puede encontrar en estado natural o ser producido a través de un proceso de purificación. Sirve para el consumo humano y animal.

Bomba.- Máquina hidráulica que convierte la energía mecánica en energía de presión, transferida al agua

Caja de válvulas.- Es una estructura hidráulica complementaria donde se alojan cualquier tipo de válvulas, necesarias para la operación de una red de agua potable o de agua tratada.

Cárcamo.- Es la estructura hidráulica complementaria del sistema hidráulico que sirve como almacenamiento provisional, para re-bompear algún líquido de un nivel inferior a uno superior. Se emplea para el agua potable, agua tratada, drenaje sanitario y drenaje pluvial.

Carga Piezométrica.- Es la suma de, la relación de la presión entre el peso específico del agua, más la elevación del conducto referenciada.

Carga total de bombeo.- Es la suma algebraica de la carga de presión manométrica medida a la descarga , corregida con la altura a la línea de centros de la toma de señal de presión, el nivel dinámico, las pérdidas por fricción en las tuberías de conducción y la carga de velocidad

Carga de velocidad.- Es la energía cinética por unidad de peso del líquido en movimiento

Coeficiente de cortante.- Es el coeficiente de rozamiento del agua con las paredes de una tubería; depende del material con que esté construido o recubierto, del diámetro de la tubería y de la velocidad del agua; con este parámetro se calculan las pérdidas de energía en una conducción de agua.

Coeficiente de utilización de un pozo.- Es el caudal que puede extraerse de un pozo por cada metro que registra de abatimiento, de acuerdo al aforo que se realice al pozo, y se mide en litros por segundo por metro.

Consumo de agua.- Volumen de agua utilizado para cubrir las necesidades reales de los usuarios. Hay diferentes tipos de consumos los cuales son: doméstico y no-doméstico.

Corriente eléctrica.- Es la intensidad de corriente que pasa a través de un conductor con resistencia R y cuya tensión eléctrica es V.

Demanda.- Volumen total de agua requerido por una población en un período de tiempo, para satisfacer todos los tipos de consumo, incluyendo las pérdidas en el sistema.

Distrito hidrométrico.- Sección que se aísla de la red, para realizar mediciones de consumo y hacer el balance de volúmenes de agua.

Dotación.- Cantidad de agua potable asignada a cada habitante en un día medio anual, considerando su consumo, más la parte proporcional de los servicios comercial e industrial, y de las pérdidas físicas que existen en el sistema de distribución, su unidad es l/hab/día

Eficiencia del sistema de agua potable.- Capacidad de captar, conducir, regularizar, potabilizar y distribuir el agua, desde la fuente natural hasta los consumidores, con un servicio de calidad total.

Error de exactitud.- es el grado de aproximación que tiene una medición a un valor estándar o patrón.

Factor de Potencia.- Es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente y describe la relación entre la potencia convertida en trabajo útil y real y la potencia total consumida.

Fuente de abastecimiento.- Sitio del cual se toma el agua para suministro en el sistema de distribución.

Fugas.- Escape físico de agua en una red de tuberías de agua potable

Fugas latentes.- Fugas que permanecen en la red de distribución y que por su magnitud, no pueden ser detectadas y reparadas.

Gasto.- Volumen de agua medido en una unidad de tiempo, generalmente se expresa en litros por segundo.

Gasto unitario.- Gasto requerido por una unidad.

Gasto medio diario.- Es el gasto requerido para satisfacer las necesidades de una población en un día de consumo promedio.

Gasto máximo diario.- Es el gasto requerido para satisfacer las necesidades de una población en el día de consumo promedio máximo anual.

Gasto máximo horario.- Es el gasto requerido para satisfacer las necesidades de una población en el día y a la hora de máximo consumo promedio anual.

Línea de conducción.- Elemento que sirve para transportar el agua de un lugar a otro de forma continua, pudiendo funcionar a presión o a superficie libre.

Nivel a centros de manómetro.- Es la distancia vertical entre el nivel de referencia y la posición del manómetro usado para medir las cargas de presión tanto en la succión como en la descarga

Nivel de referencia.- Es el nivel seleccionado como referencia para todas las mediciones hidráulicas, normalmente el plano inferior de la placa base de montaje del equipo de bombeo

Nivel de succión.- Es la distancia vertical desde el nivel de referencia hasta la superficie del agua cuando se encuentra en operación el equipo de bombeo.

Pérdida de agua.- Volumen de agua que entra en el sistema de distribución de agua, que no es consumido, medido y facturado.

Período de proyecto.- Tiempo para el cual se diseña el sistema. Es el período en que se estima que la obra o elemento del proyecto alcanza su máxima eficiencia. Depende de la situación financiera y de las características constructivas de la obra.

Población de proyecto.- Es el número de habitantes de un fraccionamiento, o localidad, que harán uso de una obra hidráulica en el final del período de diseño.

Potencia Activa.- Es la potencia consumida por un motor eléctrico que se convierte en trabajo útil.

MANUAL PARA UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA INTEGRAL EN UN SISTEMA DE AGUA Y SANEAMIENTO

Potencia Aparente.- Es la suma de las potencias activa y reactiva o el producto de la corriente y la tensión eléctrica (voltaje)

Potencia eléctrica .- Es la potencia de entrada en watt que requiere el motor eléctrico acoplado a la bomba y en operación normal

Potencia Reactiva.- Es la potencia consumida por un motor eléctrico para generar el campo magnético necesario para su funcionamiento. En el triángulo de potencias formado por las 3 potencias mencionadas, el cateto opuesto es la potencia reactiva, el cateto adyacente es la potencia activa y la hipotenusa es la potencia aparente. El ángulo θ es el formado entre la potencia aparente y la potencia activa y el FP es el $\cos\theta$.

Red de distribución.- Sistema de tubos que conducen el agua potable a través de las calles de un conjunto urbano para consumo de los usuarios.

Sectorización.- Separación de la red de distribución en zonas aisladas físicamente entre ellas, con su propia fuente de suministro de agua.

Tanque de regularización.- Depósito que tienen por objeto transformar un gasto, normalmente constante, a otro gasto variable según la demanda.

Tensión eléctrica.- Diferencia de potencial medida entre dos puntos de un circuito

Toma domiciliaria.- Instalación hidráulica conectada a la red de agua potable, que sirve para entregar el agua a los usuarios dentro del predio.

Válvula.- Dispositivo mecánico que se emplea para detener o controlar un flujo de agua en tuberías a presión.

Vida útil.- Es el tiempo en el cual se estima que la obra o elemento del proyecto funciona adecuadamente.

Capítulo 2

Antecedentes y Objetivos

2 Antecedentes y Objetivos

2.1 Antecedentes del Manual

Watergy México A.C. es una organización mexicana, emanada de la *Alliance to Save Energy (ASE)*, ONG con base en Washington D.C. que trabaja en todo el orbe desarrollando programas de eficiencia energética. Como parte de esta misión, creó en el año 2000, el programa *Watergy*, dedicado a contribuir a resolver la problemática de consumo energético en el sector de agua y saneamiento bajo un enfoque integral y ha trabajado en 5 países, desarrollando esta metodología y generando experiencias exitosas. En Junio del 2003, creó el programa *Watergy en México*, con apoyo de la *Agencia de Ayuda al Desarrollo Internacional de los Estados Unidos (USAID)*, por sus siglas en inglés), y desde su creación, ha impulsado la actividad de eficiencia energética en el sector mexicano de agua y saneamiento. En base a este trabajo ha logrado incidir sustancialmente en el enfoque que los organismos de agua municipales usan para resolver su problemática de abastecer el agua a las poblaciones, tomando en cuenta la reducción del consumo energético pero resolviendo al mismo tiempo los problemas de ineficiencia en el abastecimiento.

Desde su creación, *Watergy México*, ha trabajado desarrollado una metodología integral de eficiencia energética integrada a la eficiencia hidráulica que se ha consolidado aplicándola en casi 18 proyectos en organismos operadores de agua locales y actualmente cuenta con una estructura organizacional y herramientas suficientes para el desarrollo de proyectos de consultoría y capacitación en ésta materia. En base a este cumulo de experiencias, *Watergy México* ha venido avanzando en escribir parcialmente los conceptos, técnicas de ingeniería, métodos de creación propia; sin embargo, nunca se había tenido la oportunidad de conjuntar todo ellos. En esta ocasión, aprovechando el apoyo del *Programa de Desarrollo Bajo en Emisiones (MLED)*, por sus siglas en inglés), financiado por la USAID, se desarrolló esta versión acabada del manual, con el fin de difundirlo a lo largo de los organismos operadores del país.

2.2 Objetivos del Manual

El primer objetivo del manual es proporcionar una metodología, ordenada y practica para que los organismos operadores, desarrollen un proyecto de eficiencia e hidráulica integral, que comprenda no sólo los aspectos de eficiencia energética convencionales sino también, los aspectos de eficiencia hidráulica que influyen de manera importante en el consumo energético como son la eficiencia operativa y las pérdidas de agua por fugas.

Capítulo 3

Resumen Ejecutivo

3 Resumen Ejecutivo

De acuerdo a la experiencia de *Watergy México A.C.*, los sistemas de bombeo consumen el 90 % de la energía en los servicios de agua potable y saneamiento a las poblaciones, sin embargo, la mayoría de los sistemas y sus instalaciones electromecánicas asociadas, operan en condiciones de baja eficiencia comparada con las recomendadas por las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) relacionadas con estos sistemas y más aún, con las eficiencias alcanzables actualmente con tecnologías comercialmente disponibles. La baja eficiencia de los sistemas de bombeo en la mayoría de los casos estudiados por *Watergy* se debe principalmente a factores como: escaso mantenimiento preventivo de los equipos y sistemas asociados, falta de procedimientos ordenados para la selección de los mismos, desconocimiento de normas y falta de capacitación técnica del personal operativo.

Otro problema clave es la ineficiencia en los procesos hidráulicos involucrados con los sistemas de bombeo como inadecuados esquemas de operación, falta de control de presiones y fugas en las redes de distribución, entre otros, los cuales incrementan sustancialmente los índices energéticos con que operan estos sistemas. Cada litro de agua que pasa a través del sistema de abastecimiento representa un costo importante de energía. Por ende, además de las pérdidas de agua en forma de fugas, robo y desperdicio de los consumidores, la deficiente operación hidráulica de los sistemas de agua potable, afectan directamente la cantidad de energía consumida por los sistemas de bombeo.

Asimismo se ha demostrado que el máximo potencial de ahorro de energía se logra cuando se planean en forma conjunta las actividades para ahorrar agua y energía. Por ejemplo, un programa de reducción de fugas puede ahorrar agua y reducir las pérdidas de presión dando como resultado ahorros de energía debido a una menor demanda de bombeo. Es probable que cambiar una bomba por otra más eficiente ahorre energía. Si las dos actividades se coordinan conjuntamente a través de un programa de uso eficiente de agua y energía, la reducción de fugas por control adecuado de la presión en las redes, permitirá que se adquieran bombas más pequeñas y se mantenga el mismo servicio, lo que significará ahorros de energía aún mayores.



Optimizar el uso de energía para satisfacer las necesidades de suministro de agua al menor costo

CONCEPTO INTEGRAL WATERGY EN UN SISTEMA DE AGUA MUNICIPAL

El concepto *Watergy* que es la base conceptual de este manual; implica analizar cómo aprovechar las oportunidades de eficiencia energética en el suministro (extracción y bombeo de agua) pero también reducir las pérdidas de agua a lo largo del proceso.

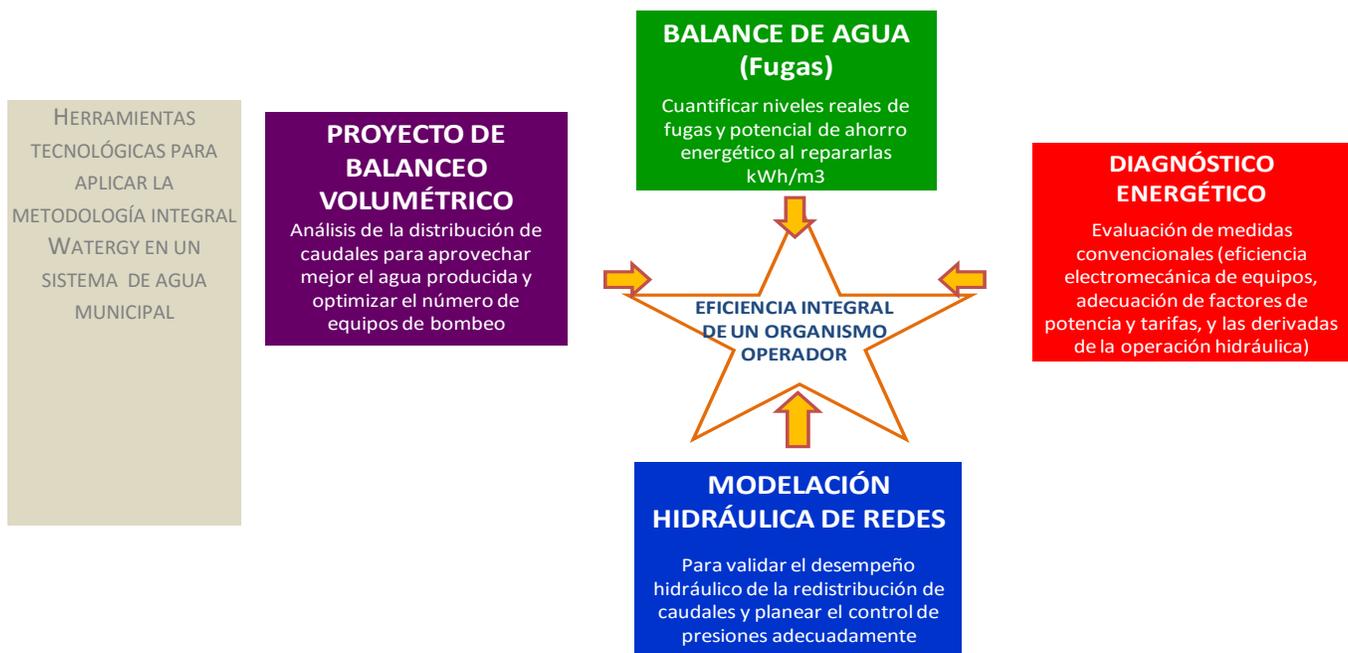
En los sistemas municipales, las oportunidades de ahorro se maximizan optimizando la operación en la red de distribución. Adicionalmente, *Watergy* propone alentar un uso más eficiente del agua del lado del consumo final. Estas dos acciones incrementan las posibilidades de ahorro de energía así como el servicio que se presta a la población al contar con más agua disponible en las redes además de otros beneficios como la reducción de costos. En la figura anexa se muestra en forma esquemática este enfoque.

Concepto integral *Watergy* en un sistema de agua municipal

Al entender la estrecha relación existente entre el agua y la energía, los organismos operadores de servicios de agua tienen la posibilidad de adaptar sus políticas y prácticas para mejorar la eficiencia en la administración de ambos recursos, lo que no sucede si se abordan por separado.

Para contribuir a resolver esta problemática, Watergy México A.C., ha desarrollado técnicas y procedimientos de ingeniería realizados de manera ordenada que constituyen una metodología útil para desarrollar un proyecto de eficiencia energética integral de los sistemas de bombeo municipales. Dicha metodología es una herramienta para determinar y aprovechar al máximo las oportunidades de ahorro de energía; fundamental para la optimización de costos operativos de los organismos operadores, pero al mismo tiempo lograr otros beneficios prioritarios para los sistemas de agua, como el mejor aprovechamiento del agua producida y el nivel de servicio a los usuarios.

Las herramientas básicas de ingeniería que utiliza la metodología Watergy son las siguientes:



HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PARA APLICAR LA METODOLOGÍA INTEGRAL WATERGY EN UN SISTEMA DE AGUA MUNICIPAL

Para el desarrollo de estos proyectos, se realizan básicamente dos etapas, la primera es el proyecto de eficiencia energética y la segunda es el proyecto de eficiencia hidráulica; al conjunto integrado de estas etapas se le conoce como *Metodología de Eficiencia Energética Integral Watergy*.

En base a las experiencias de *Watergy México*, aplicando la primera etapa solamente, se pueden lograr ahorros de energía de hasta el 15% con las medidas convencionales, entre las que se encuentran:

- Optimizar tarifas de suministro de energía.
- Reducción de pérdidas en las instalaciones eléctricas.
- Optimizar el factor de potencia.
- Mejorar la eficiencia en motores eléctricos.
- Mejorar el suministro eléctrico o cambio por alta eficiencia.
- Mejorar la eficiencia en bombas. Adecuación a condiciones de diseño o sustitución de equipo.
- Reducción de pérdidas de carga en succión y descarga de sistemas de bombeo.
- Mejorar la operación sin modificar la infraestructura, en equipos donde no se alteran condiciones de diseño.

- Reducción de pérdidas mecánicas optimizando prácticas de mantenimiento.

Sin embargo, bajo el enfoque integral, es decir, aplicando en forma conjunta la segunda etapa para realizar un proyecto que mejore la operación hidráulica, a través de una mejor distribución del agua y un adecuado control de presiones, se puede consolidar los ahorros de energía convencionales y lograr ahorros adicionales de energía con medidas resultantes de la optimización de la operación hidráulica como:

- Reducir el flujo de agua al mínimo en consecuencia la demanda eléctrica.
- Optimizar el número de equipos de bombeo al mínimo estrictamente necesario.
- Reducir la carga de bombeo optimizando los esquemas de distribución.

La aplicación de ambas etapas, arroja otros beneficios adicionales, que son muchas veces más prioritarios que el mismo ahorro de energía y representan la mayor motivación para los operadores de los sistemas de agua haciendo rentables las inversiones en este tipo de proyectos. Entre otros beneficios están los siguientes:

- Mejorar niveles de cobertura y servicio a través de:
 - Mejor aprovechamiento del agua producida.
 - Eliminación de defectos y problemas operativos.
- Aprovechar al máximo la infraestructura existente optimizando necesidades de inversión en nueva infraestructura.

Esto además de lograr la reducción de costos vía el máximo ahorro de energía posible, y reducir los impactos medioambientales como la reducir los impactos medioambientales a través de:

- Reducción de emisiones.
- Agotamiento de acuíferos.

En este manual; que contiene las técnicas específicas y todas aquellas herramientas que pretenden ser útiles para integrar los conceptos conjuntos de eficiencia en agua y energía, se ha organizado de la siguiente manera:

En la unidad 6, se describe la evolución de los conceptos en eficiencia energética e hidráulica en México y cómo puede un organismo operador desarrollar un proyecto integral aplicando todas las componentes de eficiencia energética e hidráulica integrales.

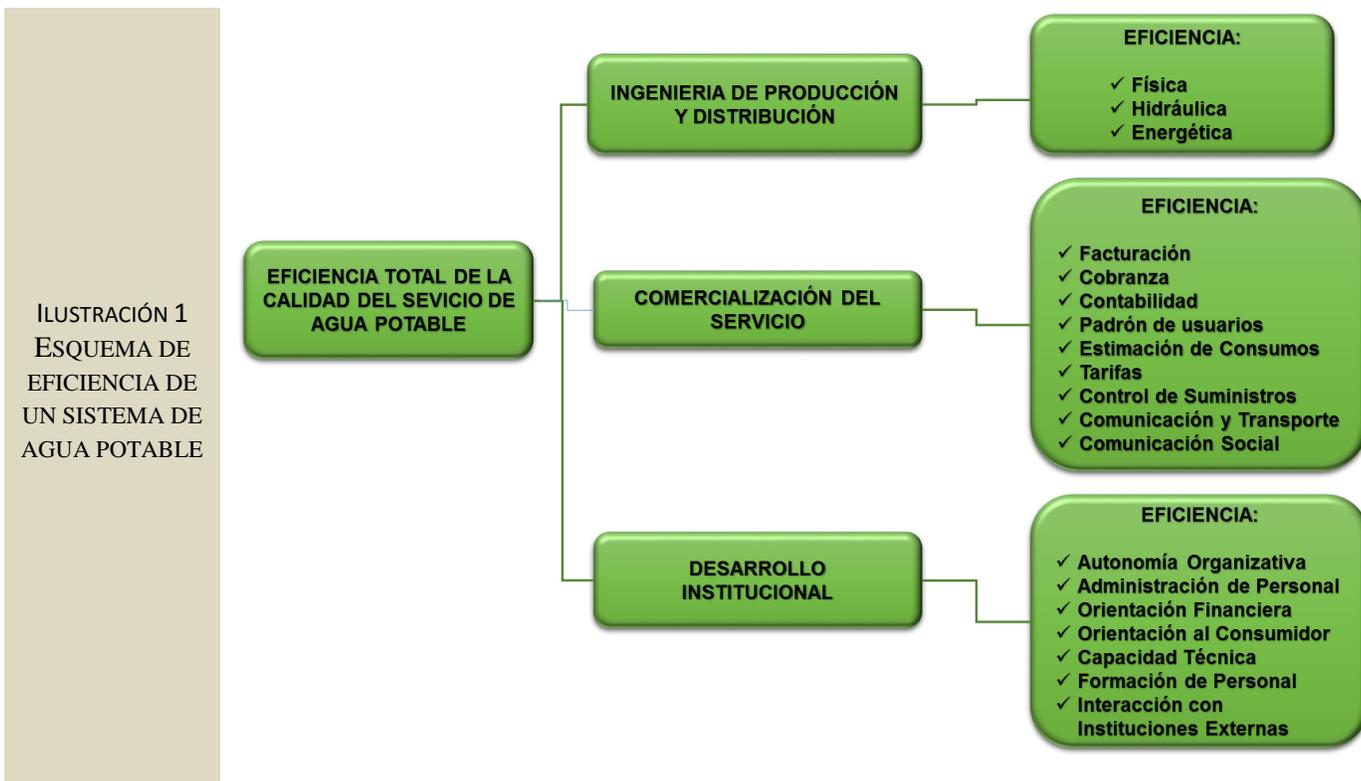
En la unidad 7, se describe cómo desarrollar una etapa previa, pero vital para este proyecto, que es la generación de los datos básicos para el proyecto, incluyendo el desarrollo del trabajo de campo que eso implica.

En las unidades 8, 9 y 10, se describen por separado como se desarrolla los proyectos específicos de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética, con el fin de servir de guía a organismos operadores que solo quieran trabajar en estas etapas parciales y no se sientan con la energía y recursos necesarios para realizar todo el proyecto integral.

En la unidad 11, se describe el cálculo de los principales indicadores que se recomienda utilizar para medir los resultados de este tipo de proyectos de manera tangible.

4 Introducción

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 total. En este contexto de la eficiencia se identifican tres escenarios: a) El de la ingeniería del sistema de abastecimiento, b) El de la comercialización de los servicios de agua potable y c) El del desarrollo institucional del organismo operador (Ochoa, 2005)¹.



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

En las actividades del escenario del 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 son el resquebrajamiento financiero e institucional del organismo operador, bajos niveles de preparación técnica del personal, desorden en la administración gerencial, excesivo número de empleados, entre otros.

En el caso de las actividades del escenario de comercialización del servicio, se desatienden las eficiencias de las áreas de facturación, cobranza, contabilidad, padrón de usuarios, estimación de consumos, tarifas, control de

¹ Ochoa L., 2005, *Planeación de acciones de incremento y control de la eficiencia en sistemas de agua potable*, publicado por la Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana, CONAGUA, México

suministros, comunicación social, y comunicación y transporte. Derivado de esta desatención, surgen los problemas de usos clandestinos, baja cobertura de micromedición, usos mal clasificados e identificados, cartera vencida importante, esquemas tarifarios lejos de la realidad, altos consumos de materiales y equipos, y una comunicación con el usuario deteriorada impactando en baja cultura del agua de la sociedad.

Por último, en las actividades del escenario de ingeniería de producción y distribución, se descuidan las eficiencias de la condición hidráulica del sistema, de 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 el 50% del volumen suministrado, agua no potable en las tomas domiciliarias, y excesivos consumos de energía en los equipos de bombeo con implicaciones económicas hasta del 35% de los ingresos del organismo operador. Estos tres escenarios mencionados reflejan la complejidad que afronta un organismo operador para mantenerse en un nivel de eficiencia aceptable, por lo que desde hace varios años se han derivado programas federales de inversión, para atender el problema de la eficiencia de sistemas de agua potable.

El presente Manual aborda la eficiencia en el escenario de ingeniería de producción y distribución, en particular las eficiencias física, hidráulica y energética, desde la perspectiva que prevalece actualmente en los sistemas hidráulicos de agua potable del país y considerando que las aplicaciones y acciones proyectadas tienen la esencia siguiente:

- Están basadas en información y datos disponibles, generando un mínimo de datos complementarios.
- Aprovechan al máximo la infraestructura existente.
- Arrojan soluciones prácticas, económicas y de implantación en el 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 del presente manual es transferir los procedimientos fundamentales para elaborar proyectos de eficiencia a los técnicos involucrados en tareas afines, con el fin de que puedan replicarlos en cualquier población de México. Con la intención de facilitar su comprensión, el manual se ha estructurado en seis secciones, varios anexos.

En el primer capítulo 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 aborda en forma conjunta 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. Se presenta también un análisis de casos de aplicación realizados en algunas ciudades de la República Mexicana, con los detalles técnicos, administrativos, sociales y económicos que motivaron su implementación. Además, se especifican los ahorros de agua y energía potenciales que resultaron en cada uno de ellos.

El proyecto de eficiencia energética se expone en el capítulo uno, donde se incluyen acciones del lado del suministro, partiendo de una inspección del estado de las instalaciones eléctricas y de las prácticas de mantenimiento, con la intención de que se obtengan ahorros de energía en forma inmediata, utilizando equipos de alta eficiencia, adecuación de las instalaciones eléctricas, acciones de mantenimiento, adecuación de tarifas, aumento del factor de potencia y administración de la demanda en hora punta.

El segundo capítulo trata sobre la información a 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 el tercer capítulo del Manual se presentan los procesos que deben tomarse 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 el capítulo cuatro se describen los elementos necesarios para realizar un Proyecto de Eficiencia Hidráulica de la red de distribución de agua potable, partiendo del diagnóstico del estado de mantenimiento de las fuentes de captación, especialmente cuando se trata de captaciones por medio de pozos profundos para determinar la capacidad de utilización y conservación de las mismas. Específicamente, 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 tuberías, válvulas, tanques, rebombes, pozos y tanques de regulación. Con este proyecto se pretende incrementar sustancialmente la mejora en la entrega del servicio de agua potable a los usuarios.

En el capítulo cinco se muestran los principales indicadores de evaluación que se recomienda aplicar para determinar la eficiencia de los sistemas de agua potable en el escenario de la ingeniería de producción y distribución.

Finalmente, el manual concluye con una serie de anexos, cuya intención es proporcionar ayuda adicional para fortalecer los procedimientos del manual.

5 Justificación

Una de las causas por las que normalmente no se llegan a desarrollar proyectos de eficiencia energética sustanciales, a pesar del impacto significativo que tienen los costos energéticos en un organismo operador, es que las preocupaciones de los técnicos y administrativos, están enfocados normalmente a prevenir y corregir problemas de suministro a los usuarios por las implicaciones sociales que eso conlleva.

Por ende, el contar con una herramienta, que les sirva de guía para conjuntar los trabajos típicos de eficiencia energética relacionados con los aspectos electromecánicos, con las prioridades de un organismo operador (como reducir las pérdidas de agua, y tener mejor control en la operación en base a técnicas de ingeniería y no prácticas empíricas), es un elemento necesario para hacer viable que se logren resultados en ahorro energético normalmente son puestos en segundo término ante las preocupaciones más imperantes.

Hasta el momento, no se cuenta en nuestro país, con una herramienta técnica que sirva de guía práctica para conjuntar ambos conceptos. Este manual intenta cubrir ese vacío.

Capítulo 4

Proyectos de eficiencia integral

6 Proyectos de eficiencia integral

En este capítulo se expone la relación que existe entre el consumo y los costos de energía eléctrica, el deterioro de los equipos de bombeo, las tarifas eléctricas, la ocurrencia de fugas en las tuberías de la red, el envejecimiento de las conducciones y la inadecuada operación para distribuir el agua a los usuarios. Asimismo, 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 proporcionan, con el fin de que el lector aprecie en forma global el contenido de dicho proyecto y visualice el contexto del presente manual.

El Proyecto de Eficiencia Integral está enfocado al manejo combinado de las eficiencias física, hidráulica y energética, que se desarrollan en los capítulos posteriores. Las eficiencias aplicadas en este contexto potencializan los ahorros de agua y energía, y el funcionamiento hidráulico de la red. Como una opción, se describe una estrategia general recomendada para determinar un PEI y lograr ahorros de energía con acciones combinadas con la eficiencia física e hidráulica, y potenciar dichos ahorros de energía 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 la República Mexicana que han realizado un PEI y que actualmente están en proceso de implementación.

6.1 La evolución de los enfoques de eficiencia física, hidráulica y energética

Las ecuaciones para determinar la potencia que demandará un equipo de bombeo y el costo anual que se paga por la operación del mismo se presentan a continuación:

$$P_{bomba} = \frac{9.8 \gamma Q_{bomba} H_t}{\eta_b}$$

ECUACIÓN 1

$$\text{Costo de Bombeo Anual} = \text{costo}_{kWh} \times \text{Potencia} \times \# \text{ horas anuales}$$

ECUACIÓN 2

Donde:

- γ = Peso específico del agua (kg/m^3).
- Q_{bomba} = Gasto (m^3/s).
- H_t = Carga dinámica total (m).
- η_b = Eficiencia entre la potencia entregada al fluido y la potencia del motor.
- Costo_{kWh} = Costo del kilowatt-hora; expresado en $\text{\$/kWh}$. De acuerdo a la tarifa del sistema evaluado.

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 el uso y por condiciones operativas que no son tomadas en cuenta en su selección, disminuyen su eficiencia η_b y por tanto, para considerar la mismas cantidades de gasto y carga, aumentan la potencia y por ende el consumo de energía. En la figura 2 se muestra

un equipo de bombeo con altas deficiencias en su operación; el desgaste de sus impulsores y el deterioro del cableado eléctrico y la falta mantenimiento posibilitan la disminución de la eficiencia del equipo.

ILUSTRACIÓN 2 EQUIPO DE BOMBEO CON EFICIENCIA BAJA



Adicionalmente, las tarifas contratadas de energía eléctrica y el número de horas anuales de operación de los equipos que se dispongan en los sistemas de agua, son factores determinantes en los costos que el organismo operador tiene que cubrir cada año. Se observa también en la ecuación 1, que existen otros dos factores que impactan directamente en el consumo de energía eléctrica, la carga dinámica total de bombeo (H_t) y el caudal (Q_b). La carga dinámica (H_t), depende de cada sistema hidráulico y de las condiciones particulares, como la profundidad del acuífero, desniveles topográficos y capacidad de conducción de las tuberías. El exceso de la carga dinámica puede ser provocado por el deterioro y el envejecimiento de las tuberías, la calidad del agua y el funcionamiento en condiciones cambiantes de presión y caudal. Indirectamente, estos efectos sobre las tuberías provocan un aumento en su rugosidad interna, aumentando con ello sus coeficientes hidráulicos de cortante (*Darcy-Weisbach* o *Hazen Williams*). Todo esto trae como consecuencia el incremento de la carga dinámica de operación de las bombas y la disminución del gasto bombeado, resultando en un incremento de consumo de energía eléctrica, respecto al diseñado.

Según estudios del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA (IMTA, 1999)², se estima que existen en México alrededor de 150,000 kilómetros de tuberías de agua potable con edades superiores a los 30 años y está comprobado que estas tuberías duplican sus coeficientes de cortante al flujo en esos 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, o si hay fugas en las tuberías, se tendrán enormes pérdidas de carga hidráulica con el consecuente incremento de la carga dinámica del bombeo y por tanto incremento en el consumo de energía eléctrica (figura 3).

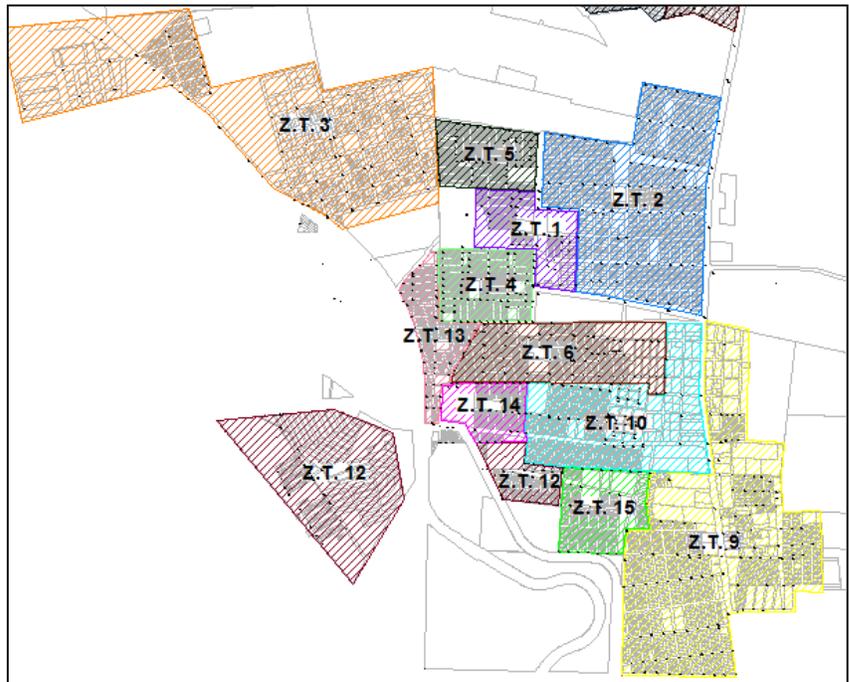
² Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (1999) Estudio de rehabilitación de tuberías en Saltillo, Coahuila, IMTA, México.

ILUSTRACIÓN 3 CADA FUGA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA PROVOCA UN AUMENTO EN LA CARGA HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE BOMBEO



Otro problema ligado a la deficiente distribución de caudales y presiones es provocado por la manipulación empírica de válvulas que realizan los operadores de los sistemas de agua, el cual obedece al crecimiento desordenado e irregular de la población y a la falta de herramientas 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”, afectando a los usuarios en un abastecimiento desconfiable y de poca calidad, con el consecuente desgaste operativo y estructural del sistema hidráulico, y costos energéticos elevados (Figura 3). En México se estima que la continuidad del servicio de agua a los usuarios es del orden de 10 horas por día, aunque hay ciudades que pueden actualmente presumir de 24 horas.

ILUSTRACIÓN 4 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), es el otro factor que es susceptible a generar desperdicio de energía eléctrica. Cada litro de agua potable bombeado ha requerido de un consumo de energía y por consiguiente un costo para el organismo operador. Si después de ser bombeada el agua, se pierde en las fugas o es derrochada por los usuarios, entonces también la energía eléctrica utilizada es desperdiciada. Las fugas incrementan la demanda de agua potable, lo que se refleja en un mayor caudal bombeado. Por lo general, nadie utiliza el agua de las fugas, lo que significa una pérdida de dinero para el organismo operador y escasez para los pobladores de la localidad. Por una sola fuga llegan a fluir caudales que van desde los 20 mililitros por segundo (ml/s) en tomas domiciliarias, y más de 250 ml/s en tuberías principales y cajas de válvulas (figura 5).



De acuerdo con resultados de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2007)³, en México la ocurrencia de fugas en tomas domiciliarias es del orden del 90%, en tuberías de la red es del 10% en promedio. También se ha determinado que en las redes de los sistemas de agua potable mexicanos se pierde cerca del 35% 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, o sea el costo de la energía eléctrica para bombearla y el cloro que se le inyecta para potabilizarla.

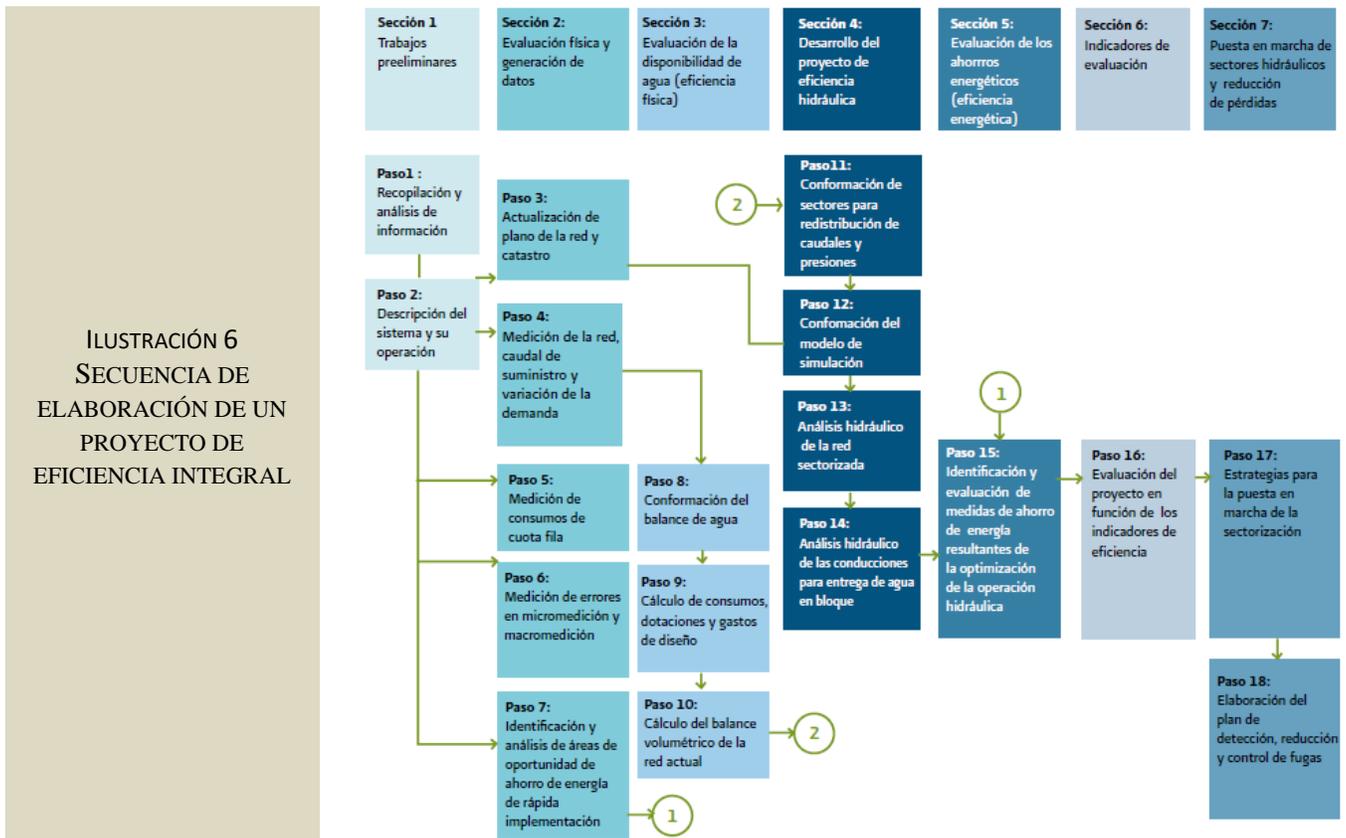
³ CONAGUA (2007) *Situación del sector agua potable en México, Informe anual 2007, Comisión Nacional del Agua, México*

6.2 Estructura del proyecto de eficiencia integral

Ante la realidad que se presenta en los sistemas hidráulicos de abastecimiento de agua a las poblaciones de nuestro país, se plantea la necesidad de solucionar las deficiencias mencionadas en forma integral, revisando las instalaciones de distribución de agua (líneas, tanques, etc.), instalaciones electromecánicas (captaciones y rebombes) y las necesidades de abastecimiento a la población (dotación, etc.). El procedimiento para elaborar e implementar estos proyectos de eficiencia se divide en 18 pasos, contenidos en las siete etapas siguientes:

- 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 figura 6.



A continuación se presenta una breve descripción de cada paso para dar a lector una visión generalizada del procedimiento a seguir para elaborar un proyecto de eficiencia integral.

6.2.1 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 capítulo 7.1 de este manual). Comúnmente se recopila información sobre el padrón de usuarios, planos de la red, equipos electromecánicos y estadísticas de producción, facturación, fugas y consumos de energía eléctrica. Entender el funcionamiento actual del sistema de agua potable es crucial para lograr un buen proyecto de eficiencia, por lo tanto se requiere conocer a detalle su infraestructura, las características de las captaciones, conducciones, red de tuberías de distribución, tomas domiciliarias, equipos de bombeo y tanques de regularización. También, se debe explorar la situación de los sistemas de macro y micromedición 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.

6.2.2 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 de la red actualizados, 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 manual se plantea una generación mínima de datos básicos, explotando al máximo las estadísticas, archivos y conocimientos del personal de los organismos de agua y realizando una campaña de mediciones de campo estratégicas, que complementan la información del organismo operador (ver capítulo 7.2 de este manual).

Las campañas de medición y levantamiento en campo se enfocan en validar la información proporcionada por el organismo, en lugar de generar nueva información con extensas campañas de medición (comprobando 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 de los mismos. Se ha encontrado que de esta manera se puede contar con catastros con un nivel de actualización, cobertura y confiabilidad cercanas al 90%, 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 también una exploración energética que consiste en evaluar los valores de los parámetros en la infraestructura electromecánica, sus condiciones de operación y mantenimiento, el consumo energético histórico, la evaluación de eficiencia, y la identificación de la forma de operar los sistemas de bombeo.

6.2.3 Evaluación de la disponibilidad de agua

Con base en la información estadística obtenida en las etapas anteriores, y verificada 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 capítulo 8.1. de este manual).

Al conocer el nivel de fugas, se puede entonces determinar la oportunidad de ahorro de agua, 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 manual, se considera reducir las fugas a un nivel aceptable del 20%, 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 actual disponible 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 de la población que no tienen 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.

6.2.4 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 primer lugar en el análisis de capacidad de producción de las fuentes de abastecimiento, de acuerdo a lo señalado en el capítulo 9.1.1., para que de acuerdo a los gastos máximos disponibles en las fuentes y la dotación y gastos de diseño se propongan los sectores de distribución en la red (ver secciones 9.1 y 9.2 del manual). El esquema de sectorización de redes de tiene ventajas sobre las redes totalmente malladas, 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.

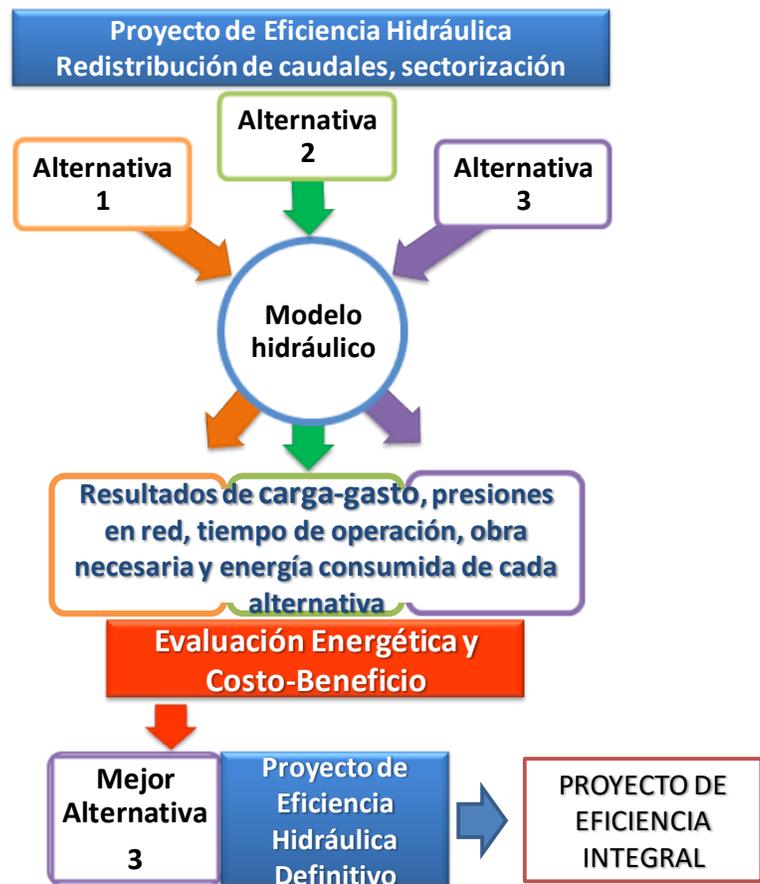
El procedimiento para elaborar el Proyecto de Eficiencia Hidráulica consiste en hacer una redistribución equilibrada de volúmenes de agua en la red, en función de las demanda de los usuarios y considerando que se alcanza la dotación de diseño. En este proceso se delimitan sectores hidráulicos, áreas de influencia de tanques y captaciones existentes. Un equilibrio en esta redistribución de caudales o un balance volumétrico de proyecto, significa que cada sector será capaz de cubrir la demanda en cantidad y calidad de servicio a sus usuarios.

Una vez definido el equilibrio del sistema de distribución mediante el balance volumétrico de proyecto y como parte fundamental de un proyecto de eficiencia integral, será la propuesta de alternativas de solución para la operación hidráulica de los sectores por medio de medidas que no sólo den como resultado una mejora en la entrega del servicio a los usuarios sino también ahorros en el consumo de energía.

Estas alternativas de solución para la operación hidráulica serán basadas en la reducción de los factores hidráulicos de la ecuación 1, es decir, la carga dinámica de bombeo (H_b) y el caudal (Q_b). No necesariamente la alternativa de solución más lógica significa la energéticamente más rentable, por ejemplo, si en un sector se definen dos zonas de suministro a diferentes niveles topográficos, una alternativa es operar un sólo equipo de bombeo que suministren la totalidad del gasto con una carga de bombeo tal, que llegue hasta las zonas más altas, y otra alternativa podría ser el tener dos equipos; uno que suministre el gasto requerido a la zona baja y otro que suministre el gasto requerido a la zona alta, menor a la zona baja y la otra operar dos equipos. Podría pensarse que la segunda alternativa podría tener menor consumo energético, sin embargo esta representaría un costo adicional de inversión, es por esto que ambas alternativas deberán evaluarse mediante el proyecto de eficiencia energética para obtener el costo-beneficio de ambas y seleccionar la mejor alternativa.

Es por esto que la definición final del Proyecto de Eficiencia Hidráulica deberá realizarse una vez definida la mejor alternativa o propuesta de solución para la optimización de la operación hidráulica. En la figura 7 para un mejor entendimiento de lo aquí planteado, se muestra en forma esquemática el procedimiento a seguir para la definición final del Proyecto de Eficiencia Hidráulica que llevará a la definición del Proyecto de Eficiencia Integral.

ILUSTRACIÓN 7 PROCEDIMIENTO PARA LA DEFINICIÓN FINAL DEL PROYECTO DE EFICIENCIA HIDRÁULICA



Después de definir el esquema de sectorización de la red, y de acuerdo al procedimiento mostrado en la figura 7, se construye un modelo de simulación hidráulica del abastecimiento y distribución del sistema de agua potable para cada alternativa. El modelo deberá estar a escala, georeferenciado y contendrá todos los tramos de la red de tuberías, tanques, rebombes, pozos, conducciones y válvulas. Actualmente, existen simuladores hidráulicos de redes de agua comerciales, que pueden ser utilizados para esta etapa del proyecto. 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 y se establecen los requerimientos de infraestructura adicional mínima o aquella que saldrá de operación de acuerdo a cada alternativa de solución y se verifica el funcionamiento hidráulico óptimo. Las condiciones de operación y demanda de cada sector resultante de la redistribución de caudales, así como las alternativas de mejora, son ingresadas y evaluadas en el modelo. Por un lado, se analizan las condiciones de velocidades y

presiones permisibles en la red, y por otro lado, se examinan las capacidades de las conducciones para la entrega de agua en bloque y de los tranques de regularización, dando como resultado las variables energéticas requeridas para la evaluación de las alternativas de solución mediante el proyecto de eficiencia energética, así como su costo beneficio.

Finalmente, la alternativa que resulte energéticamente eficiente y con el mayor costo-beneficio, 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 Proyecto de Eficiencia Hidráulica para conformar el Proyecto de Eficiencia Hidráulica final.

6.2.5 Elaboración del proyecto de eficiencia energética

El Proyecto de Eficiencia Energética (PEE) se realiza en dos partes: una que se deriva de acciones que aplican solamente del lado del suministro, denominadas de *rápida implementación* (ver capítulo 10 de este manual), y aquellas medidas que consideran también el lado de la demanda, nombradas de *mediano plazo* (ver sección 6.3).

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: cambio de equipos de bombeo y de motores existentes por equipos de alta eficiencia, readecuación de tarifas eléctricas, control de presiones mediante variadores de velocidad, utilización de capacitores y utilización de generadores diesel para sustituir suministro de energía en hora punta cuando la tarifa es HM.

Por su parte, el Proyecto de Eficiencia Energética de implementación en el mediano plazo, requiere un análisis conjunto con los resultados del proyecto hidráulico, debido a que las condiciones operativas cambiarán al redistribuir los caudales y presiones en la red y al reducir las fugas de agua. Con base en la redistribución de caudales establecida en el proyecto hidráulico, se analiza entonces la capacidad de cada sector para aplicar medidas de ahorro de energía de acuerdo a las alternativas de solución, tales como 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 cuando la tarifa de CFE es HM, y selección de equipos que pueden quedar en reserva o apagados.

Las características de carga, gasto y operación de los equipos de bombeo propuestas en las alternativas de solución del Proyecto de Eficiencia Hidráulica deberán ser evaluadas de acuerdo al procedimiento mencionado y mostrado en la figura 7, para determinar la energía que demandarán así como el costo-beneficio de la misma. La alternativa de solución con el mejor costo-beneficio y mejora energética, será entonces integrada como Proyecto de Eficiencia Hidráulica. El resultado definitivo de la evaluación energética de éste, es comparado con las estadísticas de consumo energético del año de estudio y el resultado de la comparación, se considera como un potencial de ahorro energético derivado de la aplicación del Proyecto de Eficiencia Hidráulica.

De esta manera, el Proyecto de Eficiencia Integral estará compuesto por un conjunto de medidas de mejora energética en el corto plazo, adicionando a éste el Proyecto de Eficiencia Hidráulica, con los resultados de la mejora energética esperada al implementar estos proyectos.

6.2.6 Cálculo de indicadores de evaluación

Los indicadores de evaluación son medidas de la eficiencia y eficacia⁴ del sistema de agua potable. Aunque existen una gran cantidad de indicadores, en el escenario de la eficiencia integral que nos ocupa se propone el seguimiento mínimo de los siguientes:

- Indicador Energético IE (KWh/m³)
- Indicador de Costo Unitario de Energía CPE (\$/kWh)
- Indicador de eficiencia física (IEF) (%)
- Dotación promedio por habitante (l/hab/día)
- 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 a través de ellos se pueden evaluar el desarrollo del avance que se logra en el sistema de agua potable, y en consecuencia establecer las políticas y programas en este sentido.

6.2.7 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 secciones 8.2 y 9.2 de este manual). Este trabajo no es fácil de alcanzar, pues se requiere una estrategia técnica, logística y financiera. Por ello, ha resultado efectivo elaborar un programa de ruta crítica de todo el proceso de la puesta en marcha. En este programa, que se traduce en diagramas de barras calendarizado, es posible determinar las afectaciones en los cambios que sufrirá la operación 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 el 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 y tinacos en exceso, etc.

⁴ La determinación de los indicadores anteriores se describe en el capítulo 9 de este manual.

6.3 Medidas de Ahorro de Energía Resultantes de la Optimización de la Operación Hidráulica

Las acciones seleccionadas para el ahorro de agua y energía tienen mayor impacto si se realiza en forma conjunta. Cuando el agua se desperdicia en un sistema, es evidente que también se desperdicia la energía. Incluso alentar un uso más eficiente del agua del lado del consumo final incrementa las posibilidades de ahorro de energía.

Un programa de reducción de fugas además de ahorrar agua, reduce las pérdidas de presión y da como resultado ahorros de energía. Sustituir una bomba por una de mayor eficiencia ahorra energía.

Si las dos actividades son coordinadas conjuntamente, la reducción en pérdidas de agua y de presión por fugas permitirá que se adquieran bombas de potencias menores y se mantenga el mismo servicio que se presta a la población; igualmente, si consideramos el ahorro por el agua no desperdiciada en las fugas, se contará con más agua disponible y con ello se tendrían 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 1.

Problema o defecto operativo	Consecuencia Hidráulica	Consecuencia Energética
Desbalance volumétrico en la asignación de caudales por zonas	<ul style="list-style-type: none"> • Suministro por tandeo • Mayores pérdidas de agua en redes por cambio de presiones y el deterioro de la infraestructura 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor número de horas de operación de equipos de bombeo • Mayores pérdidas energéticas por manejo de mayores horas de operación y mayores presiones en las tuberías
Falta de dispositivos de control de presión	<ul style="list-style-type: none"> • Excesivas pérdidas de agua por elevadas presiones • Mayores pérdidas de agua por fugas por el exceso de presión 	<ul style="list-style-type: none"> • Gastos mayores de energía por mayor carga de bombeo, además de desfases del punto óptimo de eficiencia de los equipos de bombeo
Carencia de tanques de regulación y desaprovechamiento de los existentes	<ul style="list-style-type: none"> • Mayores pérdidas de agua por fugas con presiones altas • Mayor deterioro de la infraestructura por regulación de gastos por válvulas en las redes 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor potencia en sistemas de bombeo en periodos pico de demanda (puntos de operación fuera de máxima eficiencia)

TABLA 1 PROBLEMAS OPERATIVOS TÍPICOS Y SUS CONSECUENCIAS EN EL CONSUMO ENERGÉTICO

Basado en estos conceptos, una etapa importante dentro de la metodología de eficiencia integrada descrita en este capítulo, consiste en determinar y cuantificar adecuadamente los ahorros de energía resultantes de los cambios en la forma de operar el sistema de distribución a través de los procesos descritos en el capítulo 9.

Estas medidas de ahorro de energía resultan de reducir el nivel de pérdidas de agua en las redes y una mejor distribución del agua producida, lo cual minimiza los vicios operativos descritos.

Las principales medidas de ahorro que normalmente resultan de este análisis son las siguientes:

- 1) Operación fuera de hora punta sin afectar la continuidad del servicio.

- 2) Operación solamente de los sistemas de bombeo que sean necesarios y 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. Esto puede implicar, reducir al mínimo el caudal y la potencia de bombeo requeridos y maximizar los beneficios de optimizar la eficiencia electromecánica, sin arrastrar ineficiencias en la carga actual.

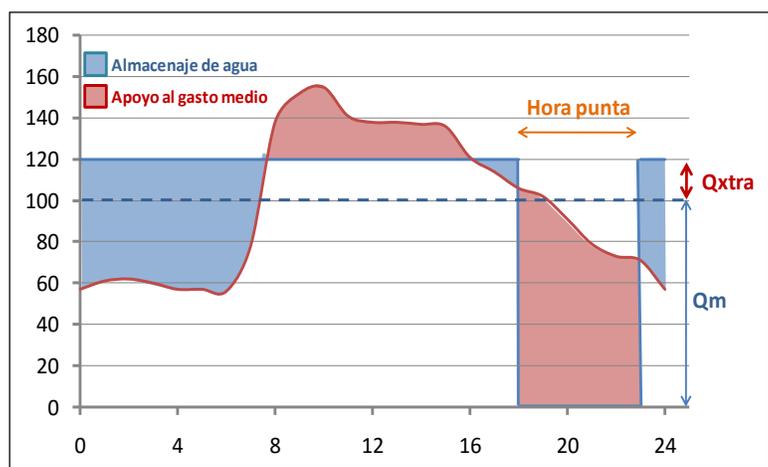
Las medidas de ahorro descritas en este capítulo serán entonces las alternativas de solución que deberán ser evaluadas de acuerdo al procedimiento mostrado en la figura 7 del capítulo 6.2. De esta forma se podría aplicar una o varias de las medidas que se describen a detalle a continuación, como propuesta de alternativa de solución para el Proyecto de Eficiencia Hidráulica.

6.3.1 Operación fuera de hora punta de equipos de bombeo

Esta medida aplica a los sistemas de bombeo que se encuentren en la tarifa horaria HM, que se explica en el Anexo D de este manual. Para evaluar la capacidad de operar fuera de hora punta, los equipos que suministren a un sector en específico, deberán de cumplir los siguientes requisitos:

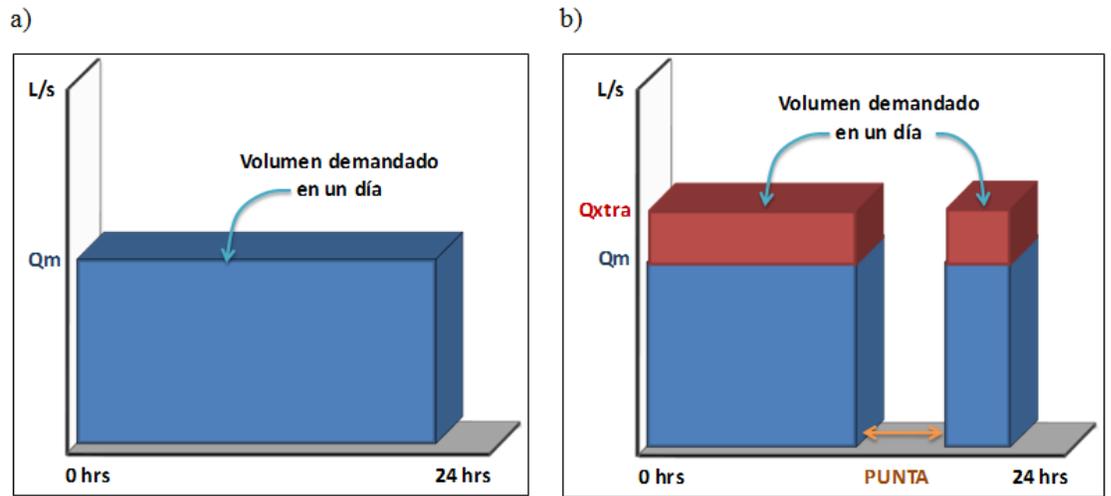
- a) **El sector deberá de contar con servicio continuo (24 horas).** Antes de proyectar paros de equipos que impliquen una disminución del volumen diario disponible para la zona y que agravan el servicio discontinuo, se debe de pensar en cambios que permitan un incremento del caudal disponible en la zona hasta lograr el servicio continuo.
- b) **Los equipos en cuestión deberán de abastecer al sector a través de un tanque regulador.** El paro en hora punta de equipos significa la disminución o paro de suministro al sector que abastece, por lo tanto es necesario que se cuente con una reserva que cubra la demanda durante las horas punta. Para esto , la función del tanque regulador será almacenar agua durante las horas no pico, donde se tendría que incrementar posiblemente el gasto medio alimentado, y descargar el agua almacenada durante la hora punta , sin que sean los equipos de bombeo los que suministren a la red sino el tanque, como se ilustra en la figura 8.

Ilustración 8 Comportamiento del volumen almacenado y demandado en un tanque con paro en hora punta



- c) **Capacidad para cubrir el volumen extra demandado en horas base para cubrir el paro en hora punta.** Cuando se realizan paros de equipos, el volumen de agua que dejan de suministrarse durante las horas de paro debe de ser cubierto durante horas base, de tal forma que el volumen de agua diario entregado a la población permanezca constante (figura 9).

Ilustración 9
Volumen demandado en un día: a) con suministro continuo, y b) con paro en hora punta



- d) **El tanque regulador deberá de contar con capacidad suficiente.** Se utilizará la metodología desarrollada en el inciso 9.2.1.3, para revisar que el tanque regulador tenga la capacidad suficiente para las condiciones de operación con el paro en hora punta.

El gasto extra en horario base para compensar el paro en hora punta se podrá calcular de dos maneras:

- 1) Horas de bombeo fijas y gasto por definir. Se utilizará la ecuación 3 para calcular el gasto extra a bombear durante las horas base.

$$Q_{extra} = \left(1 - \frac{24 \text{ horas}}{\text{horas base}} \right) * \text{gasto maximo diario}$$

ECUACIÓN 3

- 2) Gasto disponible fijo y horas de bombeo por definir. Cuando una fuente establecida, como un pozo disponible o en reserva se utilizará para cubrir el gasto extra, el horario de bombeo se definirá utilizando además la ecuación 4, para definir el tiempo de bombeo.

$$hr_{bombeo} = \left(1 - \frac{Q_{disponible}}{Q_{extra}} \right) * hr_{base}$$

ECUACIÓN 4

El gasto extra y las horas base se introducirán en porcentaje del gasto medio en la columna 2 de la tabla 2. Utilizando esta tabla de acumulados se aplicará la metodología del inciso 9.2.1.3 para calcular el volumen

requerido de regulación, el cual deberá ser menor al volumen disponible del tanque regulador para que la aplicación del paro en hora punta sea válida.

Una vez definidos el gasto extra en horario base y que el tanque regulador tiene la capacidad suficiente para cubrir la aplicación del paro en hora punta, se procede a calcular los ahorros de la siguiente manera:

Paso 1. A partir de la serie histórica de datos de facturación (los que estén contratados en tarifa HM), calcular la demanda facturable promedio actual así como los consumos de energía promedio en punta, intermedia y base de cada sistema de bombeo analizado. Se puede utilizar el formato mostrado en la tabla 3.

(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 2 EJEMPLO DEL FORMATO PARA EL CÁLCULO DE CAPACIDAD DE REGULACIÓN REQUERIDA CON PARO EN HORA

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

TABLA 3 FORMATO PARA EL CÁLCULO DE LA DEMANDA FACTURABLE PROMEDIO ACTUAL

Calcular la demanda facturable promedio actual como:

$$DF = DEM_p + FRI * (\text{máx}(DEM_i - DEM_p), 0) + FRB * (\text{máx}(DEM_B - DEM_{p,i}), 0)$$

ECUACIÓN 5

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.

Paso 2. Determinar la carga que se podrá parar en horario de punta, así como la que se tendrá que incrementar fuera del horario de punta y la demanda facturable.

Primero se determina de los datos del formato resultante de la determinación final de medidas de ahorro resultantes de la operación hidráulica, tomando los datos de carga y gasto del equipo que se controlará en hora punta calculada de acuerdo a la ecuación 1.6.

$$P_{ep} = g * \frac{Q_p * H_p}{\eta_p}$$

ECUACIÓN 6

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 (m^3/s).
- H_p = Carga dinámica total para el sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta (m).
- g = Constante de aceleración de la g Gravedad $9.81 m/s^2$.
- η_p = Eficiencia electromecánica para el sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta.

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 7.

$$DP_{hp} = DP_{pa} - P_{ep}$$

ECUACIÓN 7

Donde:

- DP_{hp} = Potencia eléctrica a ahorrar en hora punta (kW).
- DP_{pa} = Demanda de Potencia en hora punta actual (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 PE_p se convierte en cero por lo que el ahorro en potencia punta será equivalente a la demanda máxima en hora punta actual.

Paso 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 1.8.

$$DF_{fe} = (DF_{fa} - DP_{ph_p}) * FRI$$

ECUACIÓN 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.
- DP_{ph_p} = Potencia eléctrica a ahorrar en hora punta (kW).

La energía consumida en punta esperada EE_{pe} (kWh) se calcula con la ecuación 1.9.

$$EE_{pe} = EE_{pa} - (DP_{ph_p} * hr_{tp})$$

ECUACIÓN 9

Donde:

- EE_{pe} = Energía consumida en punta esperada (kWh/año).
- EE_{pa} = Energía consumida en punta actual (kWh/año).
- hr_t = Horas de duración del horario punta anuales según la región (Horas punta/año).
- DP_{ph_p} = Es la potencia eléctrica a ahorrar en hora punta (kW).

Paso 4. Determinar los ahorros económicos a obtener con la medida.

Calcular el importe de la facturación esperada en hora punta, ecuación 10.

$$\$Fe = (DF_{fe} - DF_{fa}) * CDF + (EE_{pa} - EE_{pe}) * CEP$$

ECUACIÓN 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).
- CDF = Costo unitario de la demanda facturable según la región tarifaria.
- EE_{pa} = Energía consumida en punta actual (kWh/año).
- EE_{pe} = Energía consumida en punta esperada (kWh/año).
- CEP = Costo unitario de la energía de punta según la región tarifaria.

6.3.2 Cambio de condiciones de carga y gasto en equipos de bombeo

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 y/o gastos de operación.

El procedimiento de cálculo se presenta a continuación:

Paso 1. Se definen los sectores y sistemas de bombeo que tendrán cambios y se especifican las condiciones de operación actuales. Para ello se sugiere utilizar el formato de la tabla 4.

Identificación de las zonas y equipos de bombeo				Descripción de la operación y sus cambios		Condición Actual		
Identificación del Sector Proyecto (1)	Operación del sector (2)	Sistema de Bombeo	No. Equipo	Operación Actual (3)	Operación propuesta (4)	Horas anuales de operación actuales (5)	Gasto (m3/s) (6)	Carga (mca) (7)
SH-1	Centro regulado	a	1	Se describe como opera actualmente cada sector	Se describe como se propone operar cada sector en la nueva opción de optimización hidráulica	Haoa	Qa	Ha
			2					
	Centro directo	b	1					
		c	1					
		d	1					
SH-2		e	1					
		f	1					
		g	1					
SH-n		n	1					

TABLA 4 FORMATO PARA ESPECIFICAR EQUIPOS QUE TENDRÁN CAMBIOS EN LA CARGA (MCA⁵) Y EL GASTO DE OPERACIÓN PROPUESTA

La explicación del procedimiento se presenta a continuación:

1. Se registra el sector hidráulico donde se propone operar el equipo que sufrirá cambios en sus condiciones de operación (SH-n).
2. Se especifica el tipo de operación de cada sector que puede ser regulada o suministro directo a red.
3. Se especifica la forma de operar actualmente de los sectores donde se encuentren los equipos que sufrirán cambios.
4. Se especifica la forma propuesta de operar dichos sectores y los equipos de bombeo involucrados.
5. Se registra el número actual de horas anuales de operación.
6. Se indican las condiciones de gasto, y
7. carga actuales de los equipos de bombeo con que operan.

Paso 2. Se especifican las condiciones de operación propuestas y se calculan las diferencias en base al consumo y costo energético. Para ello se sugiere utilizar la tabla 1.5.

⁵ Mca: Metros de columna de agua de carga hidráulica de bombeo

Identificación de las zonas y equipos de bombeo				Condición Propuesta				Variación en el Consumo y Facturación Energética		
Identificación del Sector Proyecto (1)	Operación del sector (2)	Sistema de Bombeo	No. Equipo	Gasto Propuesto (L/s) (8)	Carga Propuesta (mca) (9)	Horas anuales de operación (10)	Eficiencia electromecánica propuesta (11)	Ahorro en Potencia eléctrica APec (kW) (12)	Ahorro en Consumo de Energía ACec. (kWh/año) (13)	Ahorro en Facturación Energética AFec (\$/año) (14)
SH-1	Centro regulado	a	1	Qp	Hp	Haop	EEp	APec; APec1 = (Qp1* Hp1 - Qa1 * Ha1)*9.81 / EEp1	ACec; ACec1 = APec * Haop	AFec1; AFec = ACec1 * CUE
			2							
	Centro directo	b	1							
		c	1							
SH-2			d	1						
			e	1						
			f	1						
			g	1						
SH-n		n	1							

TABLA 5 FORMATO PARA EL CÁLCULO DE AHORROS ENERGÉTICOS POR CAMBIO EN CONDICIONES DE OPERACIÓN.

La explicación del procedimiento en esta parte del formato se presenta a continuación:

8. Se especifican las condiciones de Caudal (Qp),
9. y Carga (Hp) propuestas.
10. Se especifican las horas anuales de operación que tendrá el equipo de bombeo Haop.
11. Se especifica la eficiencia electromecánica para el nuevo equipo propuesto EEp
12. Se calcula el ahorro (o variación) en potencia eléctrica por cambios en condiciones de operación con la ecuación 11.

$$DPec = (Q_p * H_p - Q_a * H_a) * 9.81 / \eta_{em}$$

ECUACIÓN 11

13. Se calcula el ahorro por consumo energético anual por cambios, A\$Cec con la ecuación 12.

$$A\$Cec = DPec * hr_{op} \quad (\text{kWh/año})$$

ECUACIÓN 12

14. Se calcula el ahorro en facturación energética por cambios, AFec con la fórmula 13.

Por equipo:

$$DFec = EE_{eq} * CUE$$

ECUACIÓN 13

Donde:

- DFE_c = Facturación eléctrica ahorrada por equipo (\$/año).
- EE_{eq} = Energía eléctrica ahorrada (por equipo) (kWh/año).
- CUE = Índice 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:

$$\Delta FE_t = \sum_1^{n_x} (\Delta FE_1 + \dots + \Delta FE_n)$$

ECUACIÓN 14

Donde:

- DFE_t = Facturación eléctrica ahorrada total con todos los equipos donde aplica esta medida (kWh/año).
- DFE₁ = Facturación eléctrica ahorrada en el equipo 1 (kWh/año).
- DFE_n = Facturación eléctrica ahorrada en el equipo n (kWh/año).
- n_x = Número total de equipos donde aplica esta medida.

6.3.3 Aplicación de velocidad variable en equipos que inyectan directo a la red

Cuando la solución hidráulica para una determinada zona no implica el suministro a través de un tanque regulador, por no existir dicho tanque, infraestructura de conducciones, o por no convenir a la mejor forma de operación para dicha zona, y es necesario continuar suministrando directo a la red, se pueden utilizar las herramientas generadas que se explican en el capítulo 9 de este manual, fundamentalmente el modelo de simulación hidráulica de la red, para evaluar y determinar los parámetros de operación para la aplicación de variadores de velocidad.

Esta medida, puede o no coincidir con los sistemas que se identifican como parte de los proyectos de ahorro de rápida implementación en el capítulo 10.1.6; sin embargo, el cálculo de ahorros potenciales es diferente al explicado en ese capítulo para sistemas de bombeo 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:

Paso 1. Se identifican los sectores que operan con suministro directo a red, dónde 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 (setpoint). El formato a usar es el que se muestra en la tabla 6.

IDENTIFICACIÓN				ANÁLISIS HIDRÁULICO			
Sector Proyecto	Sub Sector	Pozo		Gasto máx propuesto (L/s)	Carga a gasto máx (mca)	Setpoint carga (mca)	Operación
		Identificación	Núm				
							Directo a red con variador de carga constante

TABLA 6 FORMATO PARA IDENTIFICAR SECTORES DE OPERACIÓN DONDE ES VIABLE EL VARIADOR DE VELOCIDAD

Paso 2. Se estiman los valores y tiempos de operación a gasto medio de la forma siguiente:

El gasto máximo (Qmax) es el propuesto.

El gasto medio y mínimo se calcula con los factores de variación máxima horaria y diaria en función del gasto máximo y en el mejor de los casos.

- $Q_{medio} = Q_{max} / 2.17$ (lps)
- $Q_{mínimo} = Q_{max} * 3.86$ (lps)

Los tiempos de operación se estiman con base en la curva de demanda sugeridos por la CONAGUA y descrita en el capítulo 9.2.3.1.

Horas al día en Qmed = 8 horas

Horas al día en Qmed = 5 horas

Horas al día en Qmin = 11 horas

El formato a usar con los valores indicados en un ejemplo es el mostrado en la tabla 7.

IDENTIFICACIÓN				ANÁLISIS HIDRÁULICO			REQUERIMIENTOS					
Sector Proyecto	Sub Sector	Pozo		Gasto máx propuesto (L/s)	Carga a gasto máx (mca)	Setpoint carga (mca)	Q requerido (L/s)			Operación (h/día)		
		Identificación	Núm				Min.	Medio	Máx.	Min.	Med.	Máx.
S H-6b	N3	FACTOR I	56	27.0	125.0	130.0	7.0	12.4	27.0	11	5	8
		FACTOR II	57	12.0	125.0	130.0	3.1	5.5	12.0	11	5	8

TABLA 7 FORMATO DE REQUERIMIENTOS DE SECTORES

Paso 3. Se calcula el consumo de energía anual operando sin variador de velocidad.

Las cargas estimadas de operación para cada Q (max, med y mín) y sus respectivas eficiencias electromecánicas se estiman de acuerdo al comportamiento de una curva de operación típica de la bomba. La potencia eléctrica P_e (kW) para cada periodo, se calcula con el gasto, carga y eficiencia electromecánicas, mediante la ecuación 15.

$$P_e = \frac{Q * H * 9.81}{\eta_{em}}$$

ECUACIÓN 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.c.a.).

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 el 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 ecuación 16.

$$EE = Pe * \# \text{ horas} * \# \text{ días} / \text{ año}$$

ECUACIÓN 16

Donde:

EE = Energía que se consumirá en el periodo correspondiente (kWh/día).

Pe = Potencia eléctrica que se demandará en el periodo (kW).

#horas = Número de horas que operará el equipo en dicho periodo.

#días/año = Número de días al año que opera el equipo.

A manera de ejemplo, en la tabla 8 se presenta el cálculo de la energía anual consumida en cada uno de los periodos (punta, medio y base), 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.

Identificación del equipo	Periodo Pico (Gasto máximo)					
	Qmáx. propuesto (m3/s)	Carga a Q máx. (m.c.a.)	η_{em} a Qmáx.	Operación (h/día)	Potencia eléctrica (kW)	Energía (kWh/año)
Pozo Factor I	0.0270	125	62.3%	8	53.14	155,181

Identificación del equipo	Periodo Medio (Gasto medio)					
	Qmed. propuesto (m3/s)	Carga a Q med. (m.c.a.)	η_{em} a Qmed.	Operación (h/día)	Potencia eléctrica (kW)	Energía (kWh/año)
Pozo Factor I	0.0124	165.4	50.3%	5	40.14	73,249

Identificación del equipo	Periodo Valle (Gasto mínimo)					
	Qmín. propuesto (m3/s)	Carga a Q mín. (m.c.a.)	η_{em} a Qmín.	Operación (h/día)	Potencia eléctrica (kW)	Energía (kWh/año)
Pozo Factor I	0.0070	171.7	35.5%	11	33.19	133,252

TABLA 8 EJEMPLO DE CÁLCULO DE ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA EN HORA PUNTA, MEDIA Y BASE

Finalmente, 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:

Energía Anual Consumida sin variador = Energía consumida en periodo punta + Energía consumida en periodo intermedio + Energía consumida en periodo valle = 155,181 kWh/año + 73,249 kWh/año + 133,252 kWh/año = 361,682 kWh/año

Paso 4. Se calcula el consumo de energía anual operando con variador de velocidad y los ahorros de energía resultantes.

La Potencia eléctrica P_e (kW) y la energía anual consumida (kWh/año) para cada periodo, se calcula con el gasto y la eficiencia determinados para cada periodo pero con una carga constante definida con el setpoint de presión validado con el modelo de simulación hidráulica. Siguiendo el mismo ejemplo, en la tabla 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.

Identificación del equipo	Período Pico (Gasto máximo)					
	Q _{máx.} propuesto (m ³ /s)	Carga a Q _{máx.} (m.c.a.)	η_{em} a Q _{máx.}	Operación (h/día)	Potencia eléctrica (kW)	Energía (kWh/año)
Pozo Factor I	0.0270	125	62.3%	8	53.14	155,181

Identificación del equipo	Período Medio (Gasto medio)					
	Q _{med.} propuesto (m ³ /s)	Carga Controlada (m.c.a.)	η_{em} a Q _{med.}	Operación (h/día)	Potencia eléctrica (kW)	Energía (kWh/año)
Pozo Factor I	0.0124	130	50.3%	5	31.55	57,572

Identificación del equipo	Período Valle (Gasto mínimo)					
	Q _{mín.} propuesto (m ³ /s)	Carga Controlada (m.c.a.)	η_{em} a Q _{mín.}	Operación (h/día)	Potencia eléctrica (kW)	Energía (kWh/año)
Pozo Factor I	0.0070	130	35.5%	11	25.13	100,890

TABLA 9 EJEMPLO DE CÁLCULO DE ENERGÍA ANUAL CONSUMIDA EN DIFERENTES PERIODOS

De manera similar que en el 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:

Energía Anual Consumida con variador = Energía consumida en periodo punta + Energía consumida en periodo intermedio + Energía consumida en periodo valle = 155,181 kWh/año + 57,572 kWh/año + 100,890 kWh/año = 313,643 kWh/año

Para un mejor resultado en la determinación de la energía utilizada por el variador de velocidad se recomienda ampliamente *la modelación hidráulica* de esta medida de solución, ya que la mayoría de los software de

modelación tienen integrada la evaluación de la energía consumida por los equipos de bombeo, y si se realiza la simulación en forma continua durante 24 horas, dará como resultado el consumo energético del equipo con y sin variador de velocidad.

El ahorro de energía se calcula restando el consumo de energía anual con variador y sin variador por simple diferencia, esto es:

$$\text{Energía Anual Ahorrada} = \text{Energía Anual Consumida sin variador} - \text{Energía Anual Consumida con variador} = 361,682 \text{ kWh/año} - 313,643 \text{ kWh/año} = 48,038 \text{ kWh/año}$$

6.3.4 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:

Paso 1. Se concentran en una tabla los siguientes datos de los equipos que quedarán en reserva:

- Potencia eléctrica demandada actual del equipo propuesto a parar totalmente (PE_{pt}) (kW), resultante de la estadística de facturación actual o de la medición de potencia eléctrica en campo si no se cuenta con dicha estadística.
- Consumo de energía actual resultante de la estadística de facturación actual (C_{ea}) (kWh/año).
- Horas de operación anuales para el sistema de bombeo propuesto a parar en forma definitiva (H_{op}) (horas/año).

Paso 2. Una vez determinada la potencia eléctrica, se calcula el ahorro energético por paro definitivo del equipo propuesto (DEE_{pt}) en kWh/año con las horas de operación anuales con la ecuación 17.

$$DEE_{pt} = P_{prop} \times hr_{op}$$

ECUACIÓN 17

Donde:

DEE_{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 (h/año).

Paso 3. Una vez determinado el ahorro energético, se calcula el ahorro en facturación energética por paro definitivo del equipo, DFE_{pt} con la ecuación 18.

Por equipo:

$$DFE_{pt} = DEE_{pt} * CUE$$

ECUACIÓN 18

Donde:

- DFE_{pt} = Facturación eléctrica ahorrada por paro definitivo de equipo (\$/año).
 DEE_{pt} = Energía eléctrica ahorrada por paro definitivo de equipo (kWh/año).
 CUE = Índice de costo energético unitario específico para el sistema en estudio (\$/kWh).

Este valor se compara con la estadística de facturación actual (Cea) para asegurar su consistencia. Por el total de equipos que salen de servicio, el ahorro total de energía se calcula con la ecuación 19.

$$\Delta EE_t = \sum_1^{n_y} (\Delta EE_1 + \dots + \Delta EE_n)$$

ECUACIÓN 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.

Paso 3. Se realiza el cálculo de ahorros económicos anuales que se obtendrán con la implantación de la medida con la ecuación 20.

$$A\$_t = DEE_t * CUE$$

ECUACIÓN 20

Donde:

- A\$_t = Ahorro económico anual que se obtendrá con esta medida (\$/año).
 DEE_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 repetir la observación que 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.

6.3.5 Cuantificación de ahorros de energía totales

Una vez calculados todos los ahorros, se procede a realizar un resumen de los ahorros de energía globales distinguiendo las medidas convencionales o de rápida implementación, calculadas en el capítulo 10.1 y las medidas resultantes de la operación hidráulica calculadas en el presente capítulo. Es importante recalcar que primero se deberá evaluar los ahorros y el costo-beneficio de las alternativas de solución propuestas de acuerdo al procedimiento de la figura 7, y para esto se puede utilizar la metodología aquí descrita.

El formato sugerido para concentrar y mostrar los potenciales de ahorro de energía se presenta en la tabla 10.

Medida de Ahorro		Ahorros (1)		%	Inversión (\$) (3)	Pay-Back (años) (4)
Tipo	Descripción	Energía (kWh/año)	Facturación (\$/año)			
Medidas convencionales	Optimización de Eficiencia Electromecánica vía Sustitución de equipos de bombeo			"(2)"		
	Optimización del Factor de Potencia					
	Adecuación de tarifas					
	Ahorro de energía por optimización de las conducciones					
	Otras medidas					
	Total Medidas Convencionales					
Optimización de la Operación 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 Watergy					
TOTALES (5) :						

TABLA 10 FORMATO DE RESUMEN DE AHORROS DE ENERGÍA DERIVADOS DEL PROYECTO INTEGRAL

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 (Pay- Back) dividiendo el valor de la inversión entre el ahorro económico anual (años).
5. Los totales de ahorro y porcentaje se obtienen con la sumatoria de todas las medidas y 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.

6.4 Proyectos de eficiencia integral aplicados en México

La metodología para realizar proyectos de eficiencia de una manera integral como se presenta en las secciones anteriores, fue desarrollada y aplicada por primera vez en la ciudad de Zihuatanejo, Gro., por los autores del manual, a través de su firma de consultoría denominada *Sistemas Hidráulicos a Presión S. A. de C.V.* y el programa *Watergy* de la *Alliance to Save Energy*. Al llevar a cabo las recomendaciones del proyecto, se obtuvieron ahorros de energía hasta en un 60%, generados por las mejoras en la operación y distribución.

Todos los casos de estudio que se presentan enseguida han sido ejecutados por los mismos autores en el contexto de eficiencia física, hidráulica y energética integral. Esto ha permitido mejorar las técnicas originales hasta alcanzar el nivel actual de desarrollo en la metodología presentada en este manual. La participación de los organismos operadores, ha sido determinante en el proceso, lo cual se pone de manifiesto y se otorga el reconocimiento por su apoyo técnico y económico.

Con el proyecto de Zihuatanejo como base, en junio del 2006 comenzó el primer proyecto de eficiencia Electromecánica, Física e Hidráulica en la ciudad de Monclova, Coahuila, terminando la primera etapa en diciembre del mismo año, y una segunda etapa en agosto del 2007. A partir de entonces, los proyectos de eficiencia integral se han aplicado en distintas ciudades de la República Mexicana, entre las cuales destacan Hidalgo del Parral en Chihuahua, Metepec y Toluca en el Estado de México, Nogales y Guaymas en Sonora y la ciudad de Durango, Durango.

A continuación se presentan resultados relevantes en cada una de las etapas del desarrollo de los proyectos.

6.4.1 Obtención de datos básicos y descripción de sistemas

Los factores comunes de las ciudades en las que se realizaron estudios en cuanto a la disponibilidad de información son:

- Actualización, cobertura y confiabilidad de planos digitales de la red entre 60% y 80%.
- Falta de detalles de fontanería de infraestructura hidráulica.
- Se carece de una idea clara en cuanto a la distribución geográfica de la población.
- Se da poca importancia a la generación y seguimiento de estadísticas de consumos, ocurrencia de fugas y presencia de usuarios clandestinos.

Los problemas más comunes que se encontraron referentes a la operación del sistema son:

- Dotaciones altas debidas a gran porcentaje de fugas.
- Tandeos debido a falta de gasto disponible.
- Bajo control de presiones en la red.
- Índices de continuidad de servicio bajos (10-18 h/día).
- Operación empírica de la red.
- Infraestructura instalada sub-utilizada.
- Poco uso de tecnología apropiada.

6.4.2 Disponibilidad de agua

Utilizando el balance de agua se determinaron los volúmenes producidos corregidos, y el consumo corregido, el cual toma en cuenta el volumen de consumo medido, correcciones por errores en estimación de cuota fija, en micromedición, el volumen por fugas y usos clandestinos encontrados, etc. En la tabla 11 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en las ciudades más representativas.

Ciudad	Año de estudio	Volumen producido corregido (miles m ³)	Volumen consumido corregido (miles m ³)	Eficiencia Física %	Pérdidas en fugas %
Monclova, Coah. 2da etapa	2006	27,566	15,802	57.3	42.7
Parral, Chih.	2006	9,940	5,097	51.3	48.7
Metepec, Edo. de Mex.	2006	20,325	14,033	69.0	31.0
Guaymas, Son.	2006	16,072	7,033	56.2	43.8
Nogales, Son.	2007			63.9	36.1
Durango, Dgo.	2007	73,830	27,053	36.6	63.4

TABLA 11 EFICIENCIA FÍSICA EN PROYECTOS REALIZADOS

Del año 1991 a 1994 la Comisión Nacional del Agua realizó estudios en distintas ciudades representativas con el que se estableció que el nivel de pérdidas promedio en los sistemas de agua potable era del 35.1% del agua suministrada al sistema. Los resultados presentados en la tabla 11 dan indicios de que el promedio de fugas en los sistemas ha tenido una tendencia a la alza en los últimos 10 años. Estos porcentajes de fugas son alarmantes ya que en la mayoría de los casos son la principal causa de insuficiencia de las fuentes de abastecimiento para cubrir las demandas con servicio continuo y presiones aceptables. Además, esta pérdida de agua se transforma de manera directa en la pérdida de energía utilizada para su extracción y distribución, como se muestra en la tabla 12.

Ciudad	Año de estudio	Volumen de fugas reducibles (miles m ³ / año)	Kilowatts-hora por ahorrar
Monclova, Coah.	2006	6'251	3'144,243
Parral, Chih.	2006	1'363	545,375
Metepec, Edo. de Mex.	2006	3,227	1'380,948
Guaymas, Son.	2007	5'818	2'926,563
Nogales, Son.	2007	3'666	1'844,283
Durango, Dgo.	2007	32'011	18'888,567

TABLA 12 AHORRO DE ENERGÍA POR REDUCCIÓN DE FUGAS AL 20% EN CIUDADES

El volumen de fugas reducibles se refiere a la diferencia que existe entre el volumen de fugas actuales y el volumen de fugas que corresponde al 20% de la producción actual.

6.4.3 Eficiencia hidráulica

Derivado de los proyectos de eficiencia hidráulica que consideran la recuperación de caudales y una mejora en la operación del sistema se obtienen resultados específicos y medibles, que pueden ser comprobados durante la implementación del proyecto. En la tabla 13 se presenta un resumen de los desequilibrios obtenidos entre la producción y demanda en cada una de las ciudades, obtenidos al aplicar la técnica de balance volumétrico. Un desequilibrio negativo en esta tabla significa que el sistema aplica servicios discontinuos en algún momento de su operación.

Ciudad	Población (miles)	Producción actual (L/s)	Demanda real actual (L/s)	Desequilibrio (L/s)
Monclova, Coah. 2da etapa	206	1,092	1,422	-330
Parral, Chih.	104	374	487	-113
Metepec, Edo Mex	187	886	956	-70
Guaymas, Son.	135	510	1,095	-585
Durango, Dgo.	461	2,695	4,370	-1,675

TABLA 13 DESEQUILIBRIOS VOLUMÉTRICOS EN CIUDADES ESTUDIADAS

Para estas ciudades se realizaron proyectos de eficiencia hidráulica, cuyas propuestas principales en común fueron:

- Aplicación de campañas de reducción de fugas al 20%.
- Operación de la red por medio de sectores hidráulicos.
- Redistribución de caudales.
- Uso adecuado de tanques de regulación.

Como resultado de los proyectos de eficiencia hidráulica, se obtienen equilibrios positivos en los balances volumétricos de las ciudades, como se observa en la tabla 14.

Ciudad	Población (miles)	Producción actual (L/s)	Demanda de proyecto (L/s)	Desequilibrio (L/s)
Monclova, Coah. 2da etapa	206	1092	801	291
Parral, Chih.	104	374	314	60
Metepec, Edo Mex	187	886	507	379

Guaymas, Son.	135	510	510	0
Durango, Dgo.	461	2695	2373	322

TABLA 14 POTENCIAL DE EQUILIBRIO VOLUMÉTRICO EN CIUDADES ESTUDIADAS

Un desequilibrio positivo representa la capacidad actual de producción que puede quedar en reserva (sin explotar) si se aplican las recomendaciones del proyecto. Es importante recalcar que la demanda del proyecto (L/s) toma en cuenta un servicio continuo de 24 horas en el sistema.

Los cambios propuestos en la operación y funcionamiento del sistema fueron validados utilizando modelos de simulación hidráulica creados para cada una de las ciudades. Para la calibración de estos modelos se tomaron en cuenta las campañas de medición de caudales, curvas de operación de equipos electromecánicos, actualización de catastro y los resultados de la eficiencia física y la eficiencia hidráulica. Los modelos representan cada una de las redes de conducción y distribución, tomando en cuenta todos sus tramos. En la tabla 15 se presenta un resumen de las características de cada modelo.

Ciudad	Nodos	Tuberías	Equipos de bombeo
Monclova, Coah. 2da etapa	5581	6,345	25
Parral, Chih.	2,542	2,796	23
Metepec, Edo Mex	3,251	3,701	45
Guaymas, Son.	3,633	4,131	51
Durango, Dgo.	11,918	13,654	84

TABLA 15 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN CREADOS

6.4.4 Eficiencia Energética

En la tabla 16 se presenta un resumen del potencial de ahorro energético obtenidos para algunos de los proyectos realizados.

Ciudad	Potencial de ahorro por medidas convencionales (%)*	Potencial de ahorro por medidas hidráulicas (%)*	Total de potencial de ahorro (%)*
Monclova, Coa.	18.0	18.4	36.4
Parral, Chi.	21.8	3.2	25.0
Metepec, Edo Mex	12.9	10.2	31.0
Guaymas, Son.	19.1	17.2	36.3
Durango, Dgo.	36.5	10.6	47.0

TABLA 16 POTENCIAL DE AHORRO ENERGÉTICO DERIVADO DE LOS PROYECTOS

*Los porcentajes son respecto al gasto anual actual en energía eléctrica

El ahorro de energía por las medidas convencionales, que en el caso de las ciudades estudiadas fueron el reemplazo de equipos electromecánicos de bombeo, ajuste de tarifas y corrección de factor de potencia, tienen la característica de poder ser aplicadas al corto plazo, con lo cual se pueden obtener incrementos de la eficiencia del sistema de manera inmediata, además de liberar recursos económicos derivados del ahorro de energía. Este potencial de ahorro se incrementa considerablemente por la aplicación de medidas de ahorro energético del lado de la demanda, como son el paro de equipos en hora punta, el uso de variadores de frecuencia y el paro de equipos por recuperación de caudal. Este tipo de medidas está sujeto a la implementación del Proyecto de Eficiencia Hidráulica, por lo que se consideran de mediano plazo.

Capítulo 5

Generación de datos básicos

7 Generación de datos básicos

La generación de datos básicos⁶ se realiza de dos maneras: a) Recopilando y analizando la información del organismo operador y, b) Mediante una campaña de medición.

7.1 Recopilación y análisis de Información

La información que se recopila en el organismo operador se muestra en la tabla 17.

ÁREA	FUENTE DE INFORMACIÓN	INFORMACIÓN POR RECOPIRAR	OBSERVACIONES
General	Padrón de usuarios	Número de tomas domiciliarias	Clasificadas por tipo de uso, con y sin medidor
		Número de tomas por colonia	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 17. INFORMACIÓN GENERAL A RECOPIRAR DEL ORGANISMO OPERADOR

⁶ 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, tales como el sistema de fotografía aérea satelital georeferenciada Google Earth y otras fuentes de internet, y la información que proporcionan entidades federales, estatales y municipales, tales como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Instituto de Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Comisiones Estatales de Agua, etc. En el Anexo A del presente manual se presentan varios formatos propuestos para facilitar la recopilación de información.

ÁREA	FUENTE DE INFORMACIÓN	INFORMACIÓN POR RECOPIRAR	OBSERVACIONES
Técnica	Estadísticas de producción y datos de las fuentes de captación.	Volúmenes suministrados al sistema	Resumen mensual, mínimo un año histórico
		Caudales producidos en las captaciones y niveles	Gastos de extracción medio anual, máximos diarios y máximos horarios, y niveles estático y dinámico, para época de verano e invierno en climas extremosos.
		Expediente de perforación de pozos profundos	Datos de ademe del pozo.- Tipo de ademe y profundidad. Registro eléctrico de resistividad del suelo. Registro de corte geológico. Estudio de desarrollo del pozo Aforo del pozo.
		Expediente de explotación	Gasto y volumen de extracción concesionado por CONAGUA (Título de concesión)
		Características de los macromedidores instalados	Tipo, modelo, fecha de instalación y calibración, diámetro
	Archivos digitales y mapotecas	Planos de la red de agua potable	A escala real, georeferenciados, con diámetros, materiales, rugosidades y longitudes de tuberías, cotas topográficas en cruceros y tipos, ubicación de pozos, rebombes y tanques, válvulas; preferentemente en formato AutoCAD o ArcView
		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 AutoCad o ArcView
		Proyectos ejecutivos anteriores	Se pueden obtener datos adicionales de planos y mediciones
		Planos de lotificación y predios	Preferentemente en formato AutoCad o ArcView
		Croquis de detalle de fontanería	De rebombes, tren de descarga de pozos, tanques de regulación; con simbología oficial CONAGUA

	Estadísticas de mantenimiento de redes.	Ocurrencia histórica de fugas	Fugas registradas en un año histórico, ocurridas en tomas domiciliarias, tuberías, red y válvulas; reportadas y reparadas mensualmente, tipos de falla, caudales unitarios vs presión, y tiempos de reparación
--	---	-------------------------------	--

TABLA 18 INFORMACIÓN A RECOPIRAR DEL ÁREA TÉCNICA DEL ORGANISMO OPERADOR

ÁREA	FUENTE DE INFORMACIÓN	INFORMACIÓN POR RECOPIRAR	OBSERVACIONES
Comercial	Facturación	Consumos de agua por tipo de usuario	Volúmenes mensuales históricos de un año, por tipo de usuario, por colonia o rutas de lectura, para cuota fija y servicio medido
		Políticas de facturación y cobro	Usuarios exentos de pago, usos públicos, escuelas, hoteles y usuarios con cuota fija, usos irregulares y clandestinos
	Estadísticas de Mantenimiento	Características de micromedidores	Tipos y modelos de aparatos, coberturas geográficas, errores históricos de exactitud, ocurrencia y tiempo de sustitución

TABLA 19 INFORMACIÓN A RECOPIRAR DEL ÁREA COMERCIAL DEL ORGANISMO OPERADOR

ÁREA	FUENTE DE INFORMACIÓN	INFORMACIÓN POR RECOPIRAR	OBSERVACIONES
Operativa (Energética)	Facturación de energía eléctrica	Datos generales del suministro eléctrico	Nombre de la compañía eléctrica que proporciona el servicio, tensión en volts, 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 puesta a tierra (eléctrico y físico de partes metálicas no conductoras) transformadores (identificación, tipo, capacidad nominal, relación de transformación, antigüedad); capacitores (ubicación, capacidad, tipo de banco, elemento desconectador, estado); arrancador o equipo de control (tipo, capacidad, ajuste); 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; curva de operación del fabricante
	Mantenimiento	Bitácoras de mantenimiento Programas institucionales	Registro histórico reciente de actividades, reparaciones a motores y bombas, registro de monitoreo de variables

TABLA 20 INFORMACIÓN A RECOPIRAR DEL ÁREA OPERATIVA DEL ORGANISMO OPERADOR

ÁREA	FUENTE DE INFORMACIÓN	INFORMACIÓN POR RECOPIRAR	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 anualizadas
		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 21 INFORMACIÓN A RECOPIRAR DEL ÁREA INSTITUCIONAL DEL ORGANISMO OPERADOR

7.2 Campaña de medición

La campaña de medición está dividida en actividades hidráulicas, en trabajos electromecánicos en equipos de bombeo, de inspección de instalaciones y verificación de mantenimiento electromecánico y por último en inspección del estado de las fuentes de captación, como se muestra en la tabla 22.

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 de flujo 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 de flujo ultrasónico o electromagnético portátil con “data-logger”
	Medición de errores de exactitud en macromedidores	Corregir los datos de volúmenes producidos y suministrados	Medidor de flujo 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
	Muestreo de ocurrencia de fugas	Estimar el caudal unitario de fugas, zonas y porcentajes de ocurrencia y tipos de fallas, para el balance de agua y el programa de control de fugas	Formatos de campo, bote calibrado y cronómetro
	Levantamiento de cajas de válvulas	Detallar planos de la red, evaluar el estado de las cajas y detectar fugas	Herramientas para destapar cajas y formatos de campo
	Levantamientos topográficos	Determinar cotas de cruceros de la red y perfiles de líneas de conducción	Estación total, niveles, sistema de posicionamiento global (GPS), software AutoCad
	Vinculación de tomas domiciliarias	Actualizar padrón de usuarios y verificar usos del agua	Formatos de campo, Sistema de Información Geográfico (SIG)
Electromecánica en equipos de bombeo	Medición de parámetros eléctricos	Determinar potencia de operación y calcular eficiencia	Analizador de potencia de redes eléctricas o equipos de medición (Voltímetro, Amperímetro, etc.)
	Medición de caudal de	Determinar el caudal de	Medidor de flujo ultrasónico

CAMPAÑA DE MEDICIÓN	ACTIVIDAD	OBJETIVO	EQUIPO Y HERRAMIENTAS
	descarga en bombas	operación del equipo	o electromagnético
	Medición de presiones en descarga y succión	Obtener carga de operación del equipo	Manómetro portátil digital con datalogger y tipo Bourdon
	Definición de niveles de referencia en bombeos	Obtener carga de operación y pérdidas de carga hidráulica	Sonda neumática, o sonda eléctrica y cinta métrica.
Estado Instalaciones Eléctricas, Sistemas de puesta a tierra y de mantenimiento eléctrico y mecánico	Medición de temperatura en componentes de conexión y equipos electromecánicos.	Determinar zonas de calentamiento en terminales, conexiones eléctricas y de las componentes de los motores para análisis de condiciones de mantenimiento	Termómetro infrarrojo.
	Medición de resistencia de puesta a tierra en elementos físicos y eléctricos del sistema de puesta a tierra	Determinar la conectividad de los sistemas de puesta a tierra y equipos	Medidor de resistencia de puesta a tierra
	Inspección de instalaciones eléctricas	Determinar el cumplimiento de las instalaciones eléctricas con la norma NOM-001-SEDE Actualizada en Mayo de 2013 como NOM-001-SEDE-2012	Cámara fotográfica, medidor de calibre de conductores.
	Medición de velocidad angular en motores externos.	Determinar la velocidad angular en la flecha del motor y determinar la eficiencia del motor mediante	Tacómetro fotoeléctrico
Estado de mantenimiento y capacidad de producción de pozos.	Medición del nivel estático y elaboración de la curva de abatimiento del pozo.	Determinar la curva de abatimiento del pozo y su coeficiente de utilización para determinar la capacidad de extracción del mismo	Medidor de flujo ultrasónico o electromagnético; Sonda neumática o eléctrica.
	Inspección del estado de los elementos que conforman el pozo.	Determinar el cumplimiento con la norma NOM-003-CONAGUA vigente, y el estado de los filtros de grava y protección de pozos.	Cámara fotográfica.

TABLA 22 DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDICIÓN

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

7.2.1 Campaña de Medición Hidráulica

La campaña de medición hidráulica consta de un grupo de trabajos de campo que se deben realizar con el fin de obtener los datos básicos necesarios para desarrollar los proyectos de eficiencia Física e Hidráulica. Estos trabajos se describen a continuación en forma detallada.

7.2.1.1 Medición de presiones en la red

La medición de presiones se realiza con un manómetro comercial tipo *Bourdon* conectado en la toma domiciliaria del sistema de distribución (ver figura 10).



No existe una base teórica específica para determinar el número de puntos de medición de presiones en la red, puesto que depende de la extensión de la ciudad. Sin embargo, con base en la experiencia y 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, se recomienda realizar del orden de un punto de medición de presión por cada 270 tomas domiciliarias registradas. 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 simulación hidráulica e interpretación de ocurrencia de fugas, es conveniente anotar la hora y el día en que es realizada la medición de presión en cada punto. De cualquier manera, de acuerdo a las posibilidades, debe considerarse la factibilidad de realizar mediciones de presión en horarios nocturnos.

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

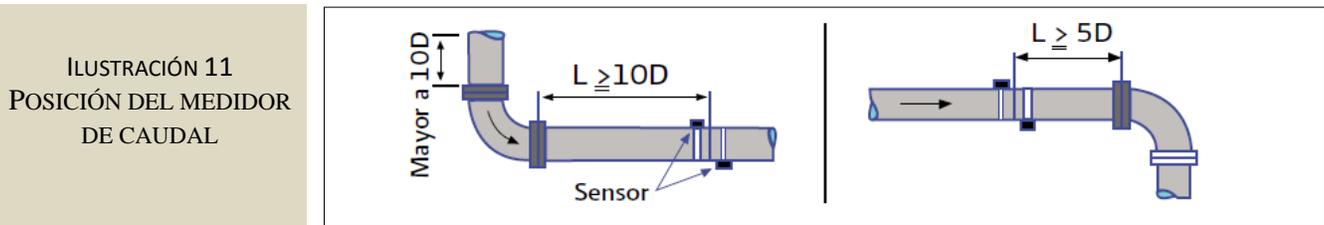
7.2.1.2 Medición de caudales suministrados

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., Esta debe realizarse exactamente en la tubería donde ingresa el agua a la red de distribución. Asimismo, en los casos de potabilizadoras, tanques o rebombes, interesa medir el caudal justo a la salida de estas estructuras.

Se recomienda 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 del capítulo 7.2.1.4 de este manual.

Cuando no existe macromedidor en la captación, se recomienda utilizar un medidor portátil del tipo ultrasónico o electromagnético, por la alta exactitud que ofrecen y la versatilidad en su uso. Este medidor debe estar certificado por un laboratorio de pruebas acreditado.

La posición del medidor en la tubería de prueba debe ser en tramos rectos y preferentemente horizontales, asegurándose de que antes y después del medidor, no existan obstáculos tales como codos, válvulas, reducciones, ampliaciones, bombas, etc., que distorsionen el perfil de velocidades del agua en la sección de prueba. Normalmente se debe dejar una distancia equivalente a 10 diámetros aguas arriba y 5 diámetros aguas abajo del eje del medidor (ver figura 11). 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 permita el fabricante en sus limitaciones de exactitud y cuando se asegure que la tubería de pruebas esté completamente llena en toda su sección. También, para garantizar la medición adecuada, deberá evitarse colocar el medidor en aquellos tramos dónde existan burbujas de aire o sólidos en suspensión.

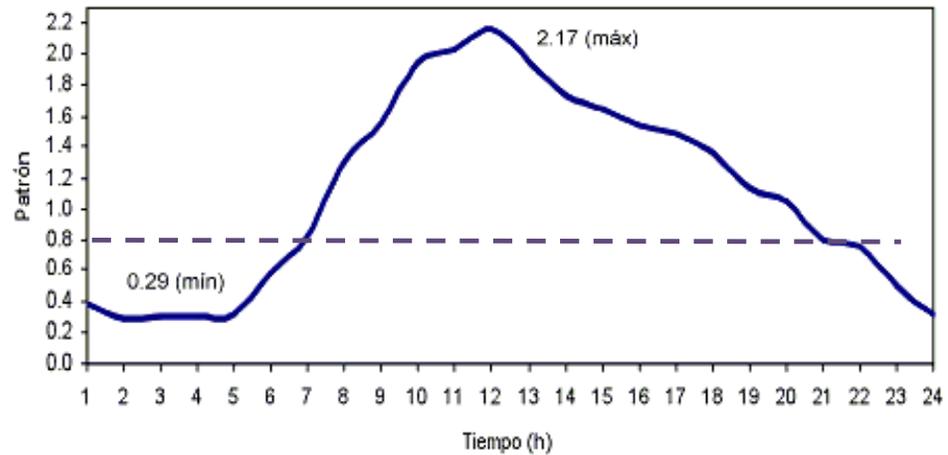
La medición de caudal suministrado se efectúa en un periodo corto, del orden de 15 a 30 minutos. Si no se detectan variaciones de caudal de +/- 5% en el transcurso de un día completo, se considerará el valor registrado como el valor de gasto medio suministrado a la red por esta captación. En caso de que la fluctuación de caudal sea mayor a este porcentaje, se deberán practicar pruebas continuas al menos durante 24 horas, con el fin de obtener un valor promedio de suministro de agua en ese punto; estas pruebas se realizarán según lo indicado en el capítulo 7.2.1.3 de este manual.

7.2.1.3 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 capítulo 7.2.1.3 de este manual. La prueba tendrá una duración de 24 horas continuas, registrando 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 figura 12.

ILUSTRACIÓN 12 CURVA TÍPICA DE VARIACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA EN UNA RED DE AGUA POTABLE



En la gráfica, el eje de las ordenadas está dado en porciento 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 identifica 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.

7.2.1.4 Medición de errores de exactitud en macromedidores

En cada uno de los macromedidores instalados en las obras de abastecimiento se debe descubrir y corregir cualquier error de medición. 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 figura 13). El punto exacto de colocación del equipo de medición portátil en la tubería de prueba deberá ajustarse a las especificaciones técnicas indicadas en el capítulo 7.2.1.2 de este manual.

ILUSTRACIÓN 13 MEDICIÓN DE ERROR DE EXACTITUD EN MACROMEDIDOR INSTALADO (COLOR AZUL), CON MEDIDOR PORTÁTIL ELECTROMAGNÉTICO DE INSERCIÓN



La evaluación del error de exactitud se efectúa con la ecuación 2.1.

$$\text{Err} = \frac{(Q_{\text{medidor}} - Q_{\text{Patrón}})}{Q_{\text{Patrón}}} \times 100$$

ECUACIÓN 21

Donde:

Q_{medidor} = Gasto instantáneo registrado en el macromedidor instalado (l/s)

$Q_{\text{Patrón}}$ = 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 porcentaje medido y calculado resulta de -4.5%, quiere decir que el valor correcto de caudal es de 104.71 l/s, en cambio, si resulta un error de +6.7%, entonces el valor correcto será de 93.72 l/s.

7.2.1.5 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 confiable de los tres, pero es el más costoso y el que tarda más tiempo en realizarse. No obstante, los otros dos dan buenas aproximaciones para efectos de evaluación y diagnóstico.

7.2.1.5.1 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 cuentan 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 22.

$$Cu_{\text{global}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_a} Cu_i}{n_a}$$

ECUACIÓN 22

Donde:

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

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

n_a = Tamaño de la muestra.

Se recomienda obtener una muestra de consumos por cada tipo de usuario, para obtener una mejor aproximación de la prueba. En el caso de usuarios domésticos se prefiere 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 el capítulo 7.2.1.6 de este manual.

Para obtener el tamaño de la muestra, se clasifica el universo de usuarios con micromedidor funcionando de acuerdo al tipo de usuario (doméstico, comercial, industrial, etc.). El total de usuarios de la muestra por cada tipo de usuario, se calcula entonces con la fórmula 23.

$$n_a = \left(\frac{Z_c^2}{\text{Err}_c^2} \right) S_c^2$$

ECUACIÓN 23

Donde:

n_a = 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 ($m^3/toma/mes$)

S_c = Desviación estándar del consumo unitario histórico en usuarios con micromedidor ($m^3/toma/mes$)

Se recomienda utilizar un error de estimación del orden del 5% 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_e) de: 0.05 * 32.64 = 1.632 m³/toma/mes, se obtiene un tamaño de muestra de:

$$n_a = \left(\frac{1.96^2}{1.632^2} \right) * 16.74^2 = 405 \text{ tomas}$$

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.

7.2.1.5.2 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 23. Cada uno de los elementos seleccionados se revisa en campo y se anotan los consumos cada semana durante un periodo mensual. Con estos datos se obtiene el consumo unitario promedio individual en cada toma domiciliaria de la muestra, en m³/toma/mes. Utilizando entonces la ecuación 22 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 del capítulo 7.2.1.6 de este manual.

7.2.1.5.3 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 periodo mensual. Con los resultados se obtiene el consumo unitario promedio de cada toma domiciliaria de la muestra y aplicando la ecuación 22 se determina el consumo unitario global promedio en m³/toma/mes.

El tamaño de la muestra se determina utilizando la ecuación 23, en donde en este caso particular, n_a es el número de tomas domiciliarias que no cuentan con micromedidor (cuota fija) y S_e corresponde a la desviación estándar de los consumos históricos registrados por los usuarios que cuentan con micromedidor.

7.2.1.6 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-SCFI-1994. El error de exactitud del micromedidor se calcula con la ecuación 24.

$$\text{Err}_m = \left(\frac{\text{Vol}_{\text{micr}} - \text{Vol}_{\text{Patrón}}}{\text{Vol}_{\text{Patrón}}} \right) * 100$$

ECUACIÓN 24

Dónde:

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 24. Debido a que la cantidad de micromedidores en un sistema suele ser de varios miles, la determinación del 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 a un grupo de aparatos de prueba. Así, se busca entonces 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 n_{mic} se obtiene aplicando la ecuación 25.

$$na_{mic} = \frac{Z_c^2}{Err_{mic}^2} \%_{mic} (100 - \%_{mic})$$

ECUACIÓN 25

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 pre estimado de micromedidores que tienen un error de exactitud fuera del límite máximo admisible ($\pm 2\%$).

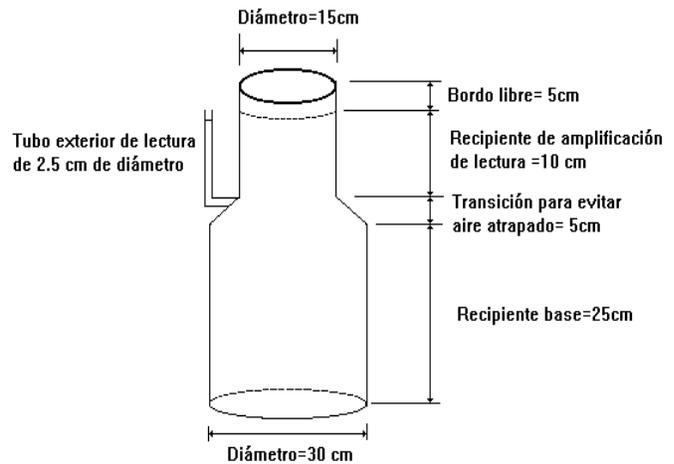
El equipo utilizado para las pruebas de error de exactitud en micromedidores consiste en un recipiente certificado y un accesorio de conexión a la toma domiciliaria, como se observa en la figura 14.

ILUSTRACIÓN 14 EQUIPO UTILIZADO EN PRUEBAS DE EXACTITUD DE MICROMEDIDORES



El recipiente está disponible en el mercado y está fabricado en acero inoxidable, tiene un volumen de 20 litros aproximadamente 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 figura 15 se muestran las dimensiones del recipiente de prueba.

ILUSTRACIÓN 15 RECIPIENTE PARA VERIFICACIÓN DE EXACTITUD EN MICROMEDIDORES



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 con el procedimiento siguiente (ver figura 16):

- 1) Primero se llena el formato con los datos de la toma del usuario, que normalmente se obtiene del padrón de usuarios. Los datos son el número de contrato, nombre del usuario, dirección, tipo y modelo del micromedidor.
- 2) Luego se desconecta el micromedidor de la toma domiciliaria en su extremo aguas abajo y se le inserta la conexión de prueba; se debe purgar el aire dentro de la manguera.
- 3) Enseguida se toma la lectura del micromedidor, en litros y decilitros.
- 4) Se abre la llave de la conexión de prueba y se llena el recipiente calibrado hasta la marca de los 20 litros, aproximadamente.
- 5) Se registra nuevamente la lectura del micromedidor.
- 6) Se anotan los valores y se repite la prueba dos o tres veces.
- 7) Se calcula el error de exactitud de cada prueba con la ecuación 24 y se hace un promedio para obtener el error del micromedidor. Si el error resulta negativo se dice que el micromedidor está submidiendo y si es positivo, entonces está sobremidiendo.

ILUSTRACIÓN 16 PRUEBA EN CAMPO DE EXACTITUD DE MICROMEDIDORES



Como un dato útil, una cuadrilla formada por un ingeniero y su ayudante pueden realizar la verificación de aproximadamente 25 micromedidores por día.

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.

7.2.1.7 Muestreo de ocurrencia de fugas

La evaluación de ocurrencia de fugas se realiza mediante un método estadístico (Arreguín y Ochoa, 1997)⁷, con el cual se pueden estimar con suficiente aproximación y confiabilidad, la cantidad de agua perdida debido a fugas existentes en el sistema de distribución, discriminadas en tomas domiciliarias, tuberías 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 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_{ftd}) y el porcentaje de tomas que presentan fuga.
2. El volumen de fugas de las tuberías principales y secundarias (Vol_{pft}) se calcula del balance de agua del sistema de abastecimiento (capítulo 3.1 de este Manual), restando los valores obtenidos de los estudios de campo de tomas domiciliarias, de los consumos (Vol_{cons}) y del volumen entregado a la red ($Vol_{suministrado}$).
3. Para mejorar la estimación de los volúmenes de fugas en tuberías principales y secundarias 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.

⁷ Arreguin Cortes F. y Ochoa Alejo L., 1997, "Evaluation of Water Losses in Distribution Networks" *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Sep-Oct, USA

Para la aplicación del método es deseable que se cuente con un mínimo de información estadística en el sistema de agua potable, como por ejemplo, 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 una encuesta piloto (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 tubería, presión de la tubería donde ocurrió, etc. Los datos serán colectados por las cuadrillas durante su trabajo.

7.2.1.7.1 Evaluación de fugas en tomas domiciliarias (*Vol_{fd}*)

El porcentaje y volumen de agua perdida por fugas en tomas domiciliarias de una población P_{ob} , se estima de dos muestras aleatorias simples, cuyos tamaños son determinados de 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 de campo en cada una de las tomas domiciliarias del estudio. Los resultados encontrados se contabilizan y se infieren a toda la población.

El tamaño de la muestra (n_o), se calcula usando la ecuación 26.

$$n_{o} = \frac{Z_c^2}{Err_{ft}^2} \%_{ft} (100 - \%_{ft})$$

ECUACIÓN 26

Donde:

n_o = tamaño de la muestra

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 pre estimado

El porcentaje de ocurrencia de fugas pre estimado ($\%_{ft}$) 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%, mismo que 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 real; 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 5%.

El nivel de confianza se selecciona de acuerdo con la disponibilidad de recursos y en función de las necesidades de precisión estadística deseada. Un análisis de sensibilidad, derivada 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% a 99%, es del orden del 80%, como se muestra en la tabla 23.

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	8,160
95	384	11,520
99	676	20,280

Calculado de los datos de 15 ciudades estudiadas con un error en la estimación (d_{it}) del 5% y porcentaje (p_{it}) del 50%

TABLA 23 COSTO DEL ESTUDIO CON RESPECTO AL NIVEL DE CONFIANZA ESPERADO

Es necesario asegurar que el tamaño de la muestra tenga un mínimo de 30 tomas domiciliarias a observar (des Raj, 1992)⁸; aquellas muestras con menos elementos deben ser tratadas como muestras pequeñas. Cuando el tamaño de la muestra (na_0), sea más grande que el 5% del número total de tomas domiciliarias conectadas al sistema de distribución (N), el tamaño de la muestra (na) debe ser corregido, utilizando la ecuación 27.

$$na = \frac{na_0}{1 + (na_0 / N)}$$

ECUACIÓN 27

Una vez determinado el tamaño de la muestra, se seleccionan con números aleatorios del listado de usuarios del sistema de agua potable, las tomas domiciliarias que se estudiarán en campo. 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, basándose en los métodos de detección de fugas por caída de presión diferencial o por sonido. Para confirmar la existencia de fuga, se procede a hacer excavación en la toma domiciliaria en cuestión. Para cada toma domiciliaria inspeccionada en la muestra, se asigna un valor de 1 si aparece con fuga, y si no, 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.

⁸ Des Raj, 1992, *Teoría del Muestreo, Fondo de Cultura Económica, Segunda Edición, México.*

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 28 (Spiegel, 1991)⁹:

$$na_q = \frac{Z_c^2}{Err_q^2} S_{qi}^2$$

ECUACIÓN 28

Donde:

- na = Tamaño de la muestra.
- Z_c = Abscisa de la curva de distribución normal para un nivel de confianza dado.
- S_{qi} = 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, al iniciar un muestreo aleatorio de fugas no se sabe cuál es la desviación estándar del gasto de fugas (S_q). En estos casos, la desviación estándar se puede estimar a partir del aforo de las fugas encontradas durante la inspección de ocurrencia. La ecuación 28 deberá ir ajustándose 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_{ai}), 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 las fugas. Este valor es el total de volumen de fugas en tomas domiciliarias del sistema de agua potable (Vol_{ftd}) 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. Adicionalmente 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.) para interpretar las posibles causas del problema. No hay que olvidar que todos los registros de campo de las mediciones deberán presentarse en formatos similares al mostrado en la tabla A.1 del **Anexo A**.

7.2.1.7.2 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. Los tamaños de las muestras de cajas de válvulas na_v y na_{qv} se calculan con las ecuaciones 29 y 30, para obtener el porcentaje de cajas de válvulas que tienen fuga y estimar el caudal unitario promedio de las fugas, respectivamente.

⁹ Spiegel, 1991, *Estadística, Segunda edición, España*.

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

ECUACIÓN 29

Donde:

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 con fugas.

$\%_{fv}$ = Ocurrencia de fugas en cajas de válvulas (%).

$$na_{qv} = \frac{Z_c^2}{Err_{qv}^2} S_{qv}^2$$

ECUACIÓN 30

Donde:

Z_c = Abscisa de la curva 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 27; 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, y estos corresponderán con las coordenadas respectivas de la caja seleccionada.

Luego de identificar en el plano a 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 el capítulo 7.2.1.8.

7.2.1.7.3 Evaluación de fugas en tuberías principales y secundarias

Para estimar el volumen de las fugas en tuberías principales y secundarias se aplica un balance de agua, según lo indicado en el capítulo 8.1. de este manual.

7.2.1.8 Levantamiento de cajas de válvulas

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

En cualquiera de los casos mencionados, antes de iniciar el trabajo de campo, es necesario 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. Toda la información se digitaliza en un plano en archivo de *AutoCad* y se forman fichas por cada una de

las cajas de válvulas inspeccionadas. En la figura 17 se presenta una ficha tipo de caja de válvula inspeccionada en campo.

El trabajo de campo es sencillo y 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 deberá anotarse esta situación en los formatos correspondientes. Una cuadrilla formada por un ingeniero y un ayudante puede realizar la inspección del orden de 20 cajas diarias.

ILUSTRACIÓN 17
FICHA TÉCNICA
TIPO DE
INSPECCIÓN DE
CAJA DE
VÁLVULAS

Calles: Av. Mar del Norte Esq. Av. Diana Laura Riojas				
Colonia: Guaymas Norte				
No. de crucero: 1				
No. de tapas: 1	No. de válvulas: 2			
Referencias:				
Croquis de localización				
La caja se encontraba azolvada por:	<table border="1"> <tr> <td>Tierra</td> <td>Basura</td> <td>Inundada</td> </tr> </table>	Tierra	Basura	Inundada
Tierra	Basura	Inundada		

Características de la válvula

Diámetro (plg) 6"

Tipo de vástago: fijo de cuadro

Comentarios: válvula completamente abierta



Fotografía de la válvula

Características de la válvula

Diámetro (plg) 4"

Tipo de vástago: válvula reguladora de presión

Comentarios: calibrada a 15 PSI



Fotografía de localización

Observaciones generales: La tubería de 6" suministra agua a las colonias Las Torres y Maquilas

También se recomienda realizar un resumen analítico de resultados globales formando cuadros como los mostrados en la tabla 24.

Resumen de condición del interior de las cajas de válvulas		
Condición	Cantidad	Porcentaje
Tierra	48	65%
Basura	3	4.1%
Inundada	6	8.1%
Buen Estado	17	23.0%
TOTAL	74	100.0%

Resumen de condición de las losas y las tapas en las cajas de válvulas		
Condición	Cantidad	Porcentaje
Daño en losa	0	0.0%
Sin losa	0	0.0%
Sin tapa	2	2.7%
Tapa soldada	0	0.0%
Tapa sin fijación	6	8.1%
Buen estado	66	89.2%
TOTAL	74	100.0%

TABLA 24

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.

7.2.1.9 Levantamientos topográficos

Para efectos del análisis hidráulico del sistema de agua potable en los proyectos de eficiencia, es determinante conocer la elevación de las tuberías, captaciones, tanques de regulación y rebombos, ya que un error en la cota topográfica del nivel del agua en un tanque de un metro puede cambiar sustancialmente los parámetros de velocidad y presión en la red. Por tal motivo, 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 cruceros 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, se recomienda consultar la base de datos del *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática* (INEGI), puesto que este órgano cuenta con varios estudios de topografía y urbanización a detalle de varias poblaciones mexicanas, que son económicos y de fácil acceso.

Los trabajos de campo de topografía, tanto de cruceros, cotas de tanques y pozos, y perfiles de conducciones se ejecutan según las especificaciones definidas en el *Manual de Lineamientos Técnicos para la Elaboración de Estudios y Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario* (MAPAS), CONAGUA.

Es importante mencionar que, actualmente existen en el mercado equipos comerciales para obtener los datos topográficos de las estructuras y cruceros de la red de distribución de agua potable, entre ellos se encuentra *La Estación Total, ET* y el *Sistema de Posicionamiento Global* (GPS). Estos equipos permiten descargar los valores levantados en campo directamente al AutoCad, son versátiles y de rendimiento alto.

7.2.1.10 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. Las irregularidades comunes son: usos de agua distintos a los registrados en el padrón de usuarios, equivocación en la existencia de micromedidor funcionando, nombre del usuario desactualizado, tomas domiciliarias inactivas, usos fraudulentos y clandestinos.

La vinculación de tomas domiciliarias comienza con la selección de rutas de recorrido. Para ello, es conveniente utilizar la experiencia del organismo operador aplicando 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 figura 18 se muestra un croquis típico de recorrido para la vinculación de tomas domiciliarias.



Luego de definir las rutas, se prepara un formato de encuesta a los usuarios y revisión de la toma domiciliaria. Interesa 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, la satisfacción del usuario con el servicio de agua. El formato puede ser preparado según convenga en cada estudio. En la tabla A.2 del **Anexo A** se muestra un ejemplo típico de estos formatos.

El procedimiento de campo para realizar las encuestas y verificaciones no sigue ninguna norma específica, por lo que puede definir cada quien su propia estrategia de actuación. No obstante, algunas recomendaciones útiles son las siguientes:

- 1) Realizar recorridos siguiendo rutas dentro de una misma área o zona. Se debe evitar recorridos dispersos puesto que disminuyen los rendimientos de la actividad.
- 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 esta se realice al 100% y no exista duda alguna de los datos.
- 4) Estandarizar los criterios de detalles sobre claves de identificación, marcas 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 populares. En zonas residenciales el rendimiento disminuye un 25%, por la

baja densidad de las viviendas. En zonas marginadas el rendimiento disminuye hasta un 40% 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 y son compatibles con los sistemas AutoCad y Excel. Por lo tanto, es recomendable que se utilicen estas tecnologías para la captura de datos de la vinculación de las tomas domiciliarias.

7.2.2 Campaña de medición electromecánica 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:

- a) La eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba y en forma separada.
- b) La curvas 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:

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

7.2.2.1 Medición de parámetros eléctricos

Los parámetros eléctricos a medir son:

- Tensión eléctrica (voltaje)
- Corriente eléctrica
- Factor de potencia
- Potencia real o activa
- Potencia reactiva

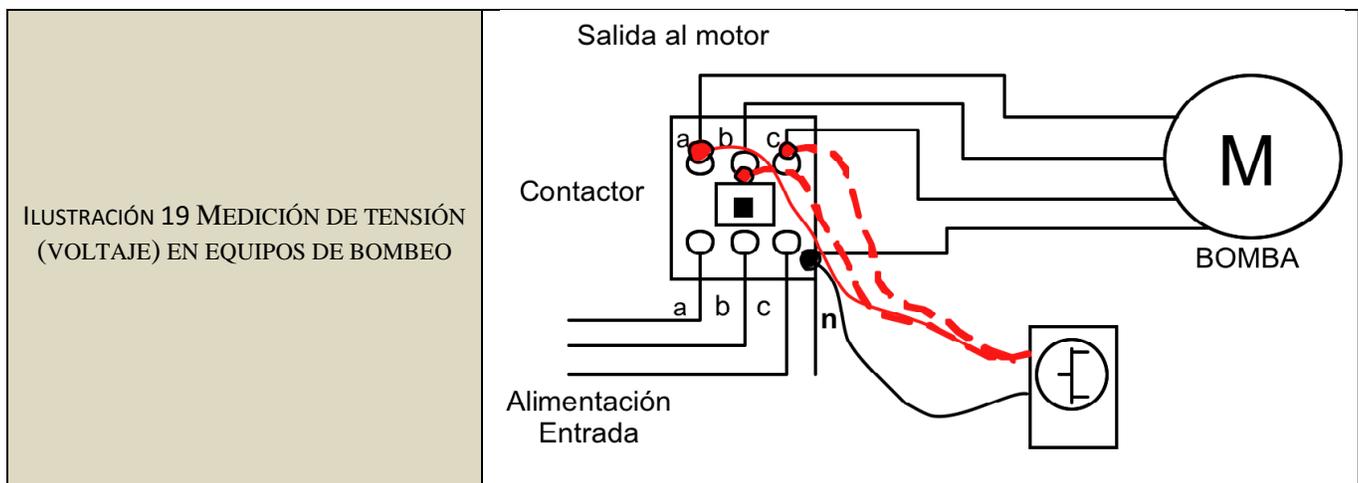
En estos casos, la utilización de equipo de medición adecuado (voltímetro, amperímetro y vatímetro,) es indispensable. Para simplificar el proceso de medición, se recomienda utilizar un analizador de circuitos eléctricos que, además de permitir la medición de parámetros por fases, integra dichas mediciones para obtener directamente los valores trifásicos, almacena en memoria información para obtener tendencias y en la mayoría de los casos, mide otros parámetros eléctricos que son importantes para evaluar la calidad de la energía utilizada en el equipo, como la distorsión armónica, entre otros. En caso de contar con un analizador de redes eléctricas, se debe tener en cuenta conectar las terminales de tensión para cada fase entre fase y neutro, y los transformadores de corriente (ganchos o anillos) en cada línea correspondiente a la fase donde se ha conectado la terminal de tensión, y de acuerdo a las figuras 19 y 20 que se señalan a continuación. En caso de contar con un banco de capacitores se debe tomar en cuenta lo señalado en el punto 7.2.2.4.

7.2.2.2 Medición de tensión eléctrica (Voltaje)

Para realizar la medición de la tensión eléctrica en equipos de bombeo, es necesario la utilización de un voltímetro, teniendo como referencia la figura 19, y proceder de la forma siguiente:

- 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".
- 6) No es recomendable realizar la medición de tensión entre fases ya que ésta no indica las diferencias en los valores de tensión de cada fase a neutro, y por lo tanto no se puede obtener las variaciones de tensión entre la tensión nominal y el de operación del motor, además de que el valor de tensión entre fases no es representativo de la tensión de alimentación al motor.

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.



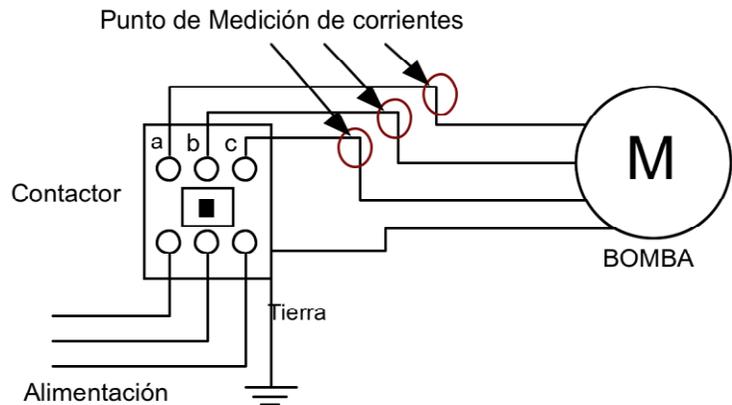
7.2.2.3 Medición de corriente eléctrica

La medición de la corriente eléctrica se efectúa con un amperímetro. El procedimiento de medición se efectúa de la manera siguiente, referido a la figura 20:

- a) Cuando se utiliza un amperímetro monofásico, las lecturas de corriente eléctrica se realizan una por una, colocándolo en cada uno de los tres cables que salen del contactor y que alimentan al motor. Las lecturas, registradas en cada cable, serán a las corrientes de las fases I_a , I_b , I_c , respectivamente. Con estos tres valores se calcula (I_{pt}) y la corriente eléctrica trifásica total (I_{tt}). 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 transformadores de corriente (ganchos o anillos) 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.

ILUSTRACIÓN 20 MEDICIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA EN EQUIPOS DE BOMBEO



7.2.2.4 Potencia real o activa

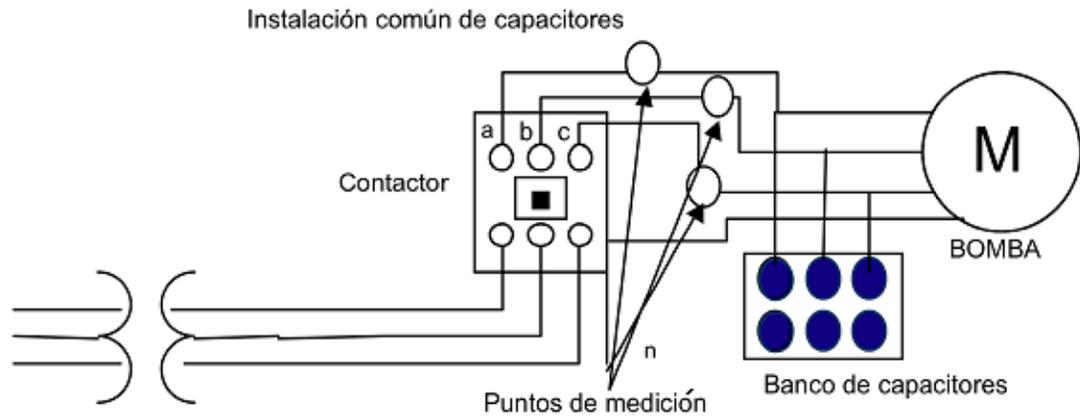
Para medir la potencia real se utiliza un vatímetro, el cual se coloca a la salida del contactor en los cables que van hacia el motor. El procedimiento para realizar la medición del valor de la potencia real o activa es el siguiente:

- 1) Se colocan las terminales de voltaje del vatímetro sobre el cable de la fase "a".
- 2) Enseguida se coloca la otra terminal de voltaje del vatímetro 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 vatímetro.
- 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 figuras 21 y 22):

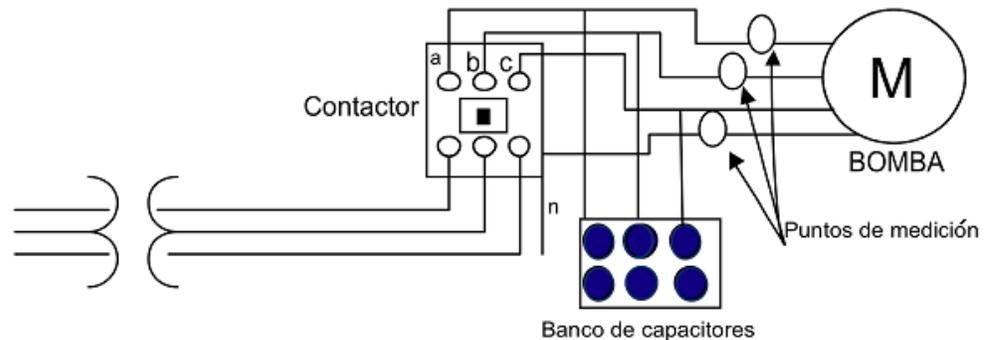
- a) La primera de ellas se debe realizar corriente abajo del punto de conexión del banco de capacitores, en los conductores que van directamente a la bomba sumergible o al motor en bombas verticales de flecha, con el objeto de que las mediciones no se vean influenciadas por el efecto de compensación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

ILUSTRACIÓN 21
MEDICIÓN DE LA
POTENCIA REAL
ANTES DE LOS
CAPACITORES



- b) 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.

ILUSTRACIÓN 22
MEDICIÓN DE LA
POTENCIA REAL
DESPUÉS DE LOS
CAPACITORES



7.2.2.5 Medición del Factor de Potencia

Para la medición del Factor de Potencia (FP) es indispensable colocar medición simultánea de tensión y corriente, por lo que es necesaria la utilización de un medidor de factor de potencia que puede ser monofásico o trifásico. Este instrumento obtiene de forma automática el valor de dicho factor de potencia. En caso de no contar con un medidor de factor de potencia, éste se calcula mediante las mediciones de tensión y corriente realizadas de acuerdo a los puntos anteriores, siempre y cuando éstas sean de forma simultánea para cada fase. De esta forma, el valor del factor de potencia se obtiene utilizando las fórmulas siguientes.

Para factor de potencia de cada fase:

$$FP_i = \frac{Pa_i}{V_{in} \times I_i}$$

ECUACIÓN 31

Donde:

FP_i =Factor de Potencia en la fase i

P_{a_i} = Potencia activa medida en la fase i, en watt (W)

V_{in} = Tensión medida en la fase i (entre fase y neutro), en volts (V)

I_i = Corriente medida en la fase i, en amperes (A)

Para el factor de potencia trifásico se aplica la siguiente fórmula

$$FP = \frac{Pa_a + Pa_b + Pa_c}{(V_{an} \times I_a) + (V_{bn} \times I_b) + (V_{cn} \times I_c)}$$

ECUACIÓN 32

Donde:

FP =Factor de Potencia trifásico

P_{a_a} = Potencia activa medida en la fase "a", en watt (W)

P_{a_b} = Potencia activa medida en la fase "b", en watt (W)

P_{a_c} = Potencia activa medida en la fase "c", en watt (W)

V_{an} = Tensión medida en la fase "a" (entre fase y neutro), en volts (V)

V_{bn} = Tensión medida en la fase "b" (entre fase y neutro), en volts (V)

V_{cn} = Tensión medida en la fase "c" (entre fase y neutro), en volts (V)

I_a = Corriente medida en la fase "a", en amperes (A)

I_b = Corriente medida en la fase "b", en amperes (A)

I_c = Corriente medida en la fase "c", en amperes (A)

7.2.2.6 *Medición de parámetros hidráulicos*

Como en el caso de la medición de parámetros eléctricos, para la medición de los parámetros hidráulicos se deberán tener los equipos de medición calibrados y en buenas condiciones de uso. Asimismo, cuando se efectúen 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 de funcionamiento gasto 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 (Ps) y descarga (Pd).
- Definición del nivel de referencia (Nr).

- Medición del nivel dinámico de succión (N_s).
- Medición de niveles a centros de manómetros (D_r-m), tanto en la succión como en la descarga según el caso explicado más adelante.

7.2.2.6.1 Medición del caudal a la descarga de la bomba

Para la medición del caudal (Q) debe seguirse la metodología y recomendaciones expuestas en el punto 7.2.1.2 de este manual. En el caso de instalaciones electromecánicas con una batería de varios equipos, como por ejemplo los rebombes, la medición de caudal debe hacerse por equipo individual, cuidando que se encuentre en la condición de operación más usual, con el fin de evaluar la situación energética en las condiciones comunes de operación.

7.2.2.6.2 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, asegurándose de su buena calibración, y que se use en el tercio medio de su escala, puesto que es donde su exactitud es la óptima. La manera de realizar la medición se muestra en las imágenes de la figura 23.

ILUSTRACIÓN 23
MEDICIÓN DE
PRESIÓN CON
MANÓMETRO TIPO
BOURDON
CALIBRADO



Para efectos prácticos, en los cálculos se recomienda expresar la presión en carga piezométrica, es decir en metros columna de agua (m.c.a.), aunque los manómetros suelen tener escalas de kg/cm^2 o $\text{lb}/\text{pulgada}^2$ (PSI). Las equivalencias de estas unidades son las siguientes:

- $1 \text{ kg}/\text{cm}^2 = 10 \text{ m.c.a.}$
- $1 \text{ lb}/\text{pulgada}^2 = 0.7031 \text{ m.c.a.}$

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. La medición de la presión en la descarga sí es indispensable realizarla.

7.2.2.6.3 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 las figuras 24 y 25.

ILUSTRACIÓN 24 MEDICIÓN DE NIVELES EN CASO DE TENER ÚNICAMENTE MANÓMETRO EN LA DESCARGA

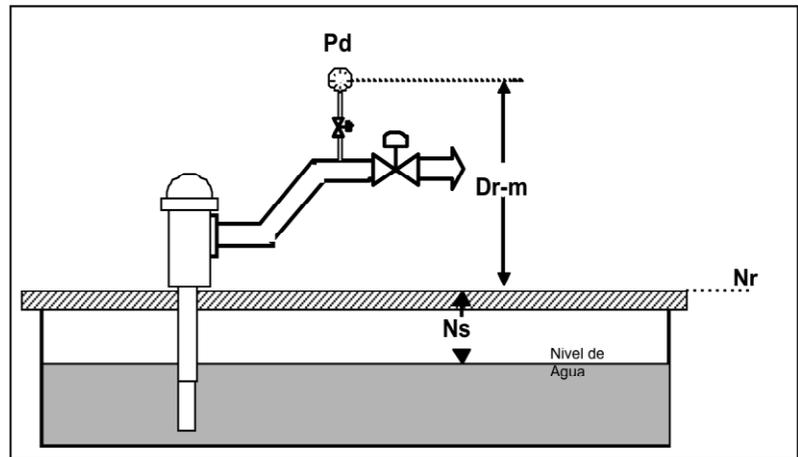
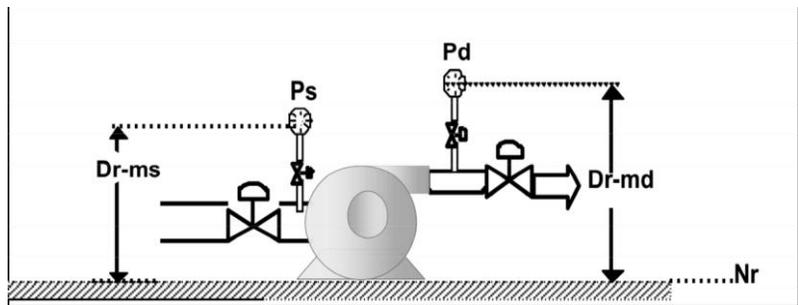


ILUSTRACIÓN 25 MEDICIÓN DE NIVELES EN CASO DE CONTAR CON MANÓMETROS EN SUCCIÓN Y DESCARGA



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

7.2.2.6.4 Medición del nivel dinámico de succión

El nivel de succión (N_s) es la distancia vertical entre el nivel de referencia y el espejo de agua de donde se está bombeando el 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 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 figuras 26 y 27 se muestra la medición de nivel dinámico con una sonda eléctrica tanto en un cárcamo de bombeo como en un pozo profundo.

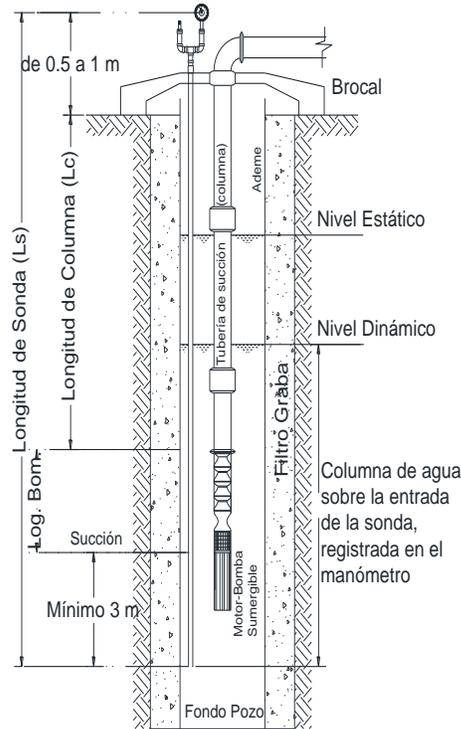
ILUSTRACIÓN 26 MEDICIÓN
DEL NIVEL DINÁMICO DE
SUCCIÓN EN UN POZO
PROFUNDO Y EN UN
CÁRCAMO DE BOMBEO CON
SONDA ELÉCTRICA



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 si el nivel se encuentra por debajo o por encima del nivel de referencia.

Aun cuando la sonda eléctrica es la más utilizada para determinar el nivel dinámico en pozos, ésta puede presentar algunos inconvenientes en la lectura de los niveles en un pozo profundo, ya que en algunas ocasiones los escurrimientos en el pozo pueden mojar el sensor eléctrico antes de llegar al nivel del agua, en otras es posible que la sonda se atore no permitiendo llegar al nivel correspondiente. Por estas razones es sumamente recomendable que se instalen en todos los pozos un dispositivo llamado “sonda neumática” para la medición de los niveles dinámico y estático de pozos profundos (ver figura 27). Esta sonda instalada debidamente da una lectura directa de la distancia desde la superficie del pozo, al nivel del agua.

ILUSTRACIÓN 27
ESPECIFICACIÓN
PARA LA
INSTALACIÓN
DE UNA SONDA
NEUMÁTICA EN
POZOS
PROFUNDOS.



Para pozos con bomba tipo Turbina Vertical con flecha

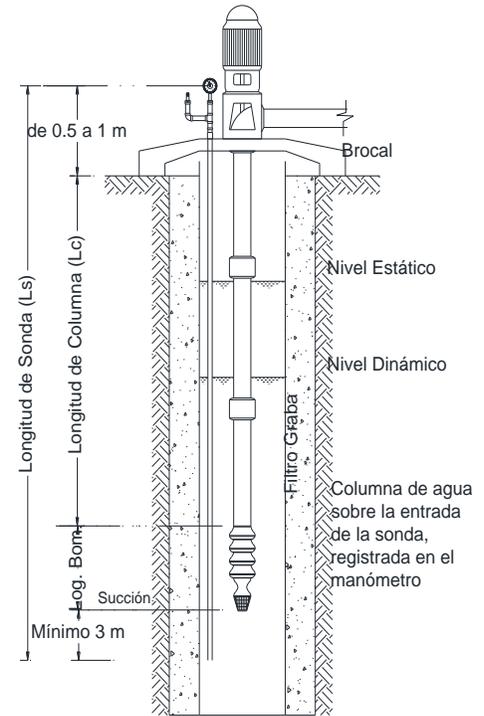
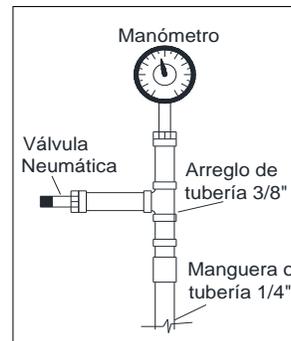


ILUSTRACIÓN 28 DETALLE DEL ARREGLO PARA
CONECTAR LA SONDA NEUMÁTICO AL MANÓMETRO



Se instala en el pozo una manguera de 6.35 mm (1/4") con uniones a prueba de fugas de aire hasta una profundidad mayor a la del nivel de succión del equipo de bombeo. Se fija un manómetro de presión al extremo de la manguera mediante un arreglo con tubería que permita la conexión hermética con la manguera instalada. Este se conecta a la parte superior de la manguera a través de una TEE. Una válvula neumática (pivote para llanta) se adapta al otro brazo de la TEE (ver figuras 27 y 28). Para obtener la medición del nivel del agua en el pozo, se conecta una bomba manual o compresor de aire a la válvula neumática. Cuando toda el agua es forzada fuera del tubo o manguera con el aire bombeado, la manecilla del manómetro se detiene, indicando en kg/cm² la presión del agua a la entrada de la manguera, y al multiplicar por 10, la columna de agua que existe sobre la manguera. Para obtener el nivel se resta a la longitud total de la sonda, la columna de agua medida.

Para la instalación de la Sonda Neumática se recomienda lo siguiente:

- a) La manguera o tubería debe ser a prueba de fugas para obtener lecturas correctas. Se recomienda manguera verde de uso rudo (para compresor de aire). Si se requiriera la instalación de más de un tramo de manguera, se debe tener especial cuidado en que la unión quede herméticamente sellada.
- b) El manómetro debe tener una escala cuyo valor máximo será $8 \times (L_s - \text{Nivel dinámico})$ en kg/cm^2 .
- c) La parte inferior de la línea de aire debe estar mínimo a tres metros abajo de la succión de la bomba.
- d) Al instalar el arreglo de tuberías para el manómetro y la válvula neumática, se deberá cuidar que no existan fugas de aire.
- e) Se recomienda que la longitud total de la sonda (L_s) sea con valores cerrados para poder realizar operaciones rápidas cuando se hagan las mediciones. Es decir si el arreglo quedará instalado a 213.12 m es mejor incrementar a 213.5 m la longitud a la manguera.
- f) Se recomienda fijar una placa en el arreglo del manómetro anotando la longitud total de la sonda (L_s), en tinta indeleble, para poder tomar la lectura del nivel en forma más rápida.

En la figura 29 se observa un ejemplo de instalación de una sonda neumática tanto en un pozo con bomba tipo sumergible como en un pozo con bomba tipo turbina vertical.

ILUSTRACIÓN 29 EJEMPLO DE
INSTALACIÓN DE SONDA
NEUMÁTICA EN POZOS
PROFUNDOS



7.2.2.6.5 Medición de niveles a centros de manómetros

En las figuras 24 y 25 anteriores, 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} . Para el caso de 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} .

7.2.2.7 Determinación de la carga hidráulica de bombeo

Las mediciones de presión y niveles descritos en los incisos 7.2.2.6.1 a 7.2.2.6.5 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 25, 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 en turno.

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

TABLA 25 PROCESO DE CÁLCULO PARA LA CARGA HIDRÁULICA DE BOMBEO (H_b) Y PARÁMETROS A MEDIR.

7.2.2.8 Formatos de registro de datos en campo

Es importante el uso de formatos de campo organizados para registrar tanto 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 26 se muestra un ejemplo del formato sugerido para el registro de las características del sistema electromecánico y los datos nominales tanto de la bomba como del motor. En la tabla 27 se presenta un formato que puede utilizarse en las mediciones de variables hidráulicas y eléctricas de los equipos de bombeo.

FORMATO DE CAMPO PARA DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO A EQUIPOS DE BOMBEO

Lugar : _____ Fecha : _____

ORGANISMO:	_____	
SISTEMA:	_____	EQUIPO: _____
OPERACIÓN:	_____	Eva: _____

1.1. SISTEMA ELÉCTRICO

<p>SUMINISTRO ELÉCTRICO: Suministrador: _____ No. de Servicio: _____ Tarifa contratada: _____</p> <p>TRANSFORMADOR: Tipo: _____ Capacidad: _____ kVA Rel. de transf.: _____ V.</p> <p>INTERRUPTOR PRINCIPAL Marca: _____ Capacidad: _____ A Ajuste: _____ A</p> <p>ARRANCADOR: Tipo: _____ Capacidad: _____ HP</p> <p>PROTECCIÓN Marca: _____ Capacidad: _____ A Ajuste: _____ A</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;">DIAGRAMA UNIFILAR</div>	<p>CAPACITORES Capacidad: _____ kVAr Calibre conductor: _____</p> <p>CONDUCTORES</p> <p>Transformador - Arrancador Calibre: _____ Longitud: _____ m. Agrupamiento: _____</p> <p>Arrancador - Motor Calibre: _____ Longitud: _____ m. Agrupamiento: _____</p>
<p>OBSERVACIONES: _____ _____ _____</p>		

1.2 MOTOR ELÉCTRICO

DATOS DE PLACA o NOMINALES:		
Marca: _____	Tensión: _____ V	Tipo: _____
Capacidad: _____ HP	Corriente: _____ A	Frame: _____
Velocidad: _____ RPM	Eficiencia: _____	F.S. _____
HISTORIAL:		
Antigüedad: _____ años	Operación: _____ hrs/año	# de rebobinados: _____
OBSERVACIONES: _____ _____		

1.3 BOMBA

<p>CUERPO Marca: _____ Tipo: _____ Modelo: _____ Antigüedad: _____ años</p>	<p>IMPULSOR Tipo: _____ Material: _____ Diámetro: _____ m Antigüedad: _____ años</p>	
FLECHA: _____	Diámetro: _____ pulg.	Longitud: _____ m
DATOS DE DISEÑO: Carga: _____ m.c.a.		Gasto: _____ lps
OBSERVACIONES: _____ _____		

1.4 CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO

Fluido: _____	Temp.: _____ °C	Peso Específico: _____ kg/m ³
OBSERVACIONES: _____ _____		

TABLA 26 FORMATO PARA EL REGISTRO DE DATOS NOMINALES Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ELECTROMECAÁNICO

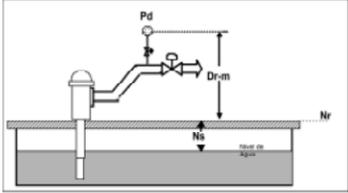
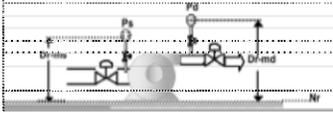
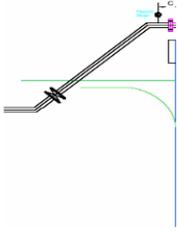
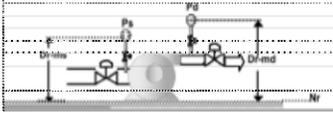
2.1 MEDICIONES HIDRÁULICAS													
NIVELES:													
Nivel del depósito de succión (A):		m.	Longitud de tubería en succión (B):		m.								
Distancia descarga a manómetro (C):		m.	Altura manómetro de descarga (D):		m.								
N. Estático		m.	Coefficiente de Utilización		lps/m								
TIPO DE SISTEMA DE BOMBEO													
A) Bomba Verticales u Horizontal que bombean en la parte superior de carcamo													
			C) Bomba sumergible de pozo o carcamo										
													
B) Bomba tipo Booster o rebombes de la parte inferior de tanque o carcamo													
Anotar en el campo de "Presión de Succión" la lectura del manómetro o el nivel del tanque (kg/cm2). El "Nivel del Depósito de succión" será siempre "0" en este caso													
													
	Diametro (m)	Pulg.	Material	Presión (kg/cm2)	Flujo (lps)	Velocidad (m/s)							
Succión			AC										
Descarga			AC										
TOPOGRAFIA:	Elevación en sitio de equipo:			m.s.n.m.	Elevación sitio mas alto de entrega: m.s.n.m.								
OBSERVACIONES: _____													
2.2 MEDICIONES ELÉCTRICAS													
TENSIÓN POR FASE:	Vab:		Vbc:		Vca:								
CORRIENTE POR FASE:	Ia:		Ib:		Ic:								
POTENCIA ACTIVA:	Pa:		Pb:		Pc:								
FACTOR DE POTENCIA	Fpa:		FPb:		FPc:								
DISTORSIÓN ARMÓNICA:	THD-V		THD-I										
Punto de Medición:													
CORRIENTE DEL CAPACITOR:	Ia:		Ib:		Ic:								
LUGAR DE CONEXIÓN DEL CAPACITOR AL SISTEMA													
OBSERVACIONES: _____													
Nombre del Archivo: _____													
2.3 MEDICIONES DE TEMPERATURA													
En el Equipo Control	de	Entrada al Interruptor			Salida del Interruptor			Entrada al Arrancador			Salida del Arrancador		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
		MOTOR			TRANSFORMADOR								
Carcasa	Rodamientos		Bornes Alimentador			Bornes de baja Tensión			Bote		Radiador		
	Sup.	Inf.	X1	X2	X3	X0	X1	X2	X3	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
OBSERVACIONES: _____													

TABLA 27 FORMATO PARA EL REGISTRO DE MEDICIONES DE VARIABLES HIDRÁULICAS Y ELÉCTRICAS DE EQUIPOS DE BOMBEO

La simbología usada en estos formatos de las tablas 28 y 29 corresponde a la indicada en la NOM.¹⁰

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
FLUJO				
PRESIÓN DE DESCARGA				
NIVEL DINÁMICO	SONDA ELÉCTRICA :			
	SONDA NEUMÁTICA :			
POTENCIA ELÉCTRICA (MEDICIÓN DIRECTA)				
POTENCIA ELÉCTRICA MEDICIÓN INDIRECTA	Voltímetro			
	Amperímetro			
	Factorímetro			
DURACIÓN DE LA PRUEBA	FECHA:		RESPONSABLE:	

¹⁰ NOM-006-ENER 1995 sobre eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación; para el Reporte De Pruebas En Campo, aplicables específicamente a este tipo de sistemas.

	HORA DE INICIO:		HORA DE FINALIZACIÓN:
--	-----------------	--	-----------------------

TABLA 28 FORMATO A. REPORTE DE PRUEBAS EN CAMPO DE LA NOM-006-ENER-1995

#	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN				
1	Di	DIÁMETRO INTERNO DE LA TUBERÍA (m)				
2	n	FRECUENCIA DE ROTACIÓN (RPM)				
3	ND	NIVEL DINÁMICO (m)				
4	x	DISTANCIA DESDE EL NIVEL DE REFERENCIA A LA LÍNEA DE CENTROS DEL MANÓMETRO (m)				
5	P1	LECTURA DEL MANÓMETRO A LA DESCARGA (m)				
6	Pm	PRESIÓN A LA DESCARGA = [(4) + (5)] (m)				
7	A	ÁREA DEL TUBO A LA DESCARGA = [3,141 592 × (1) ² /4] (m ²)				
8	qv	FLUJO (m ³ /s)				
9	hv	CARGA DE VELOCIDAD = [{"(8)/(7)} ² / 19,613 3] (m)				
10	hfc	PERDIDAS DE FRICCIÓN EN LA COLUMNA (m)				
11	hd	CARGA A LA DESCARGA = [(6) + (9) + (10)] (m)				
12	H	CARGA TOTAL = [(3) + (11)] (m)				
13	IA IB IC I	CORRIENTE LÍNEA A CORRIENTE LÍNEA B CORRIENTE LÍNEA C PROMEDIO = [(IA + IB + IC) / 3] (A)				
14	VAB VAC VBC V	TENSIÓN FASE AB TENSIÓN FASE AC TENSIÓN FASE BC PROMEDIO = [(VAB + VAC + VBC) / 3] (V)				
15	fpA fpB fpC fp	FACTOR DE POTENCIA LÍNEA A FACTOR DE POTENCIA LÍNEA B FACTOR DE POTENCIA LÍNEA C PROMEDIO = [(fpA + fpB + fpC) / 3] (%)				
16	Pe	POTENCIA DE ENTRADA AL MOTOR = 1,732×(13)×(14)×(15) X 10-5 (kW)				
17	Ps	POTENCIA DE SALIDA DE LA BOMBA = [(8) × (12) × 9,806] (kW)				
18	h	EFICIENCIA ELECTROMECAÁNICA = [(17) / (16)] × 100 (%)				

TABLA 29 FORMATO B. REPORTE DE PRUEBAS EN CAMPO DE LA NOM-006-ENER-1995

7.2.2.9 *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:

1. 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.
2. Contar con los datos necesarios para alimentar de información al modelo de simulación hidráulica del sistema de agua potable, que es parte del Proyecto de Eficiencia Hidráulica, que se explica en el capítulo 9 del presente manual.

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

1. Curva de caudal (Q) vs carga de bombeo (Hb).
2. Curva de caudal (Q) vs eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba (η_b).

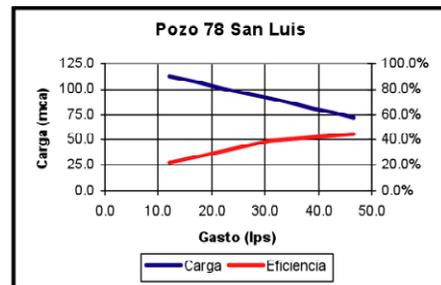
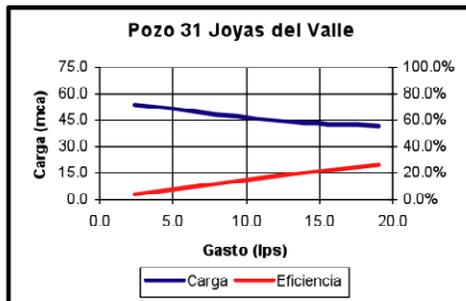
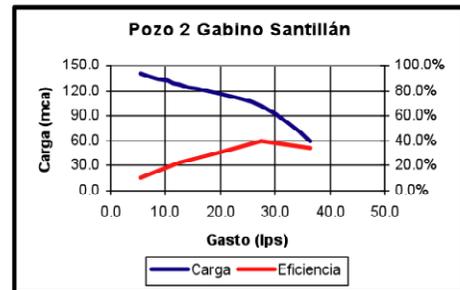
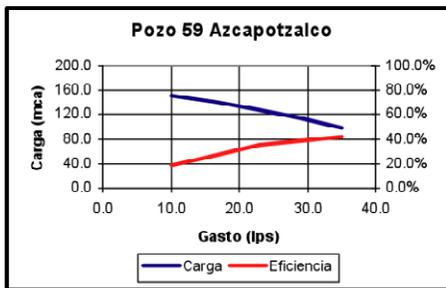
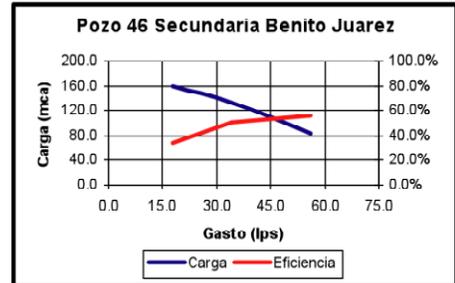
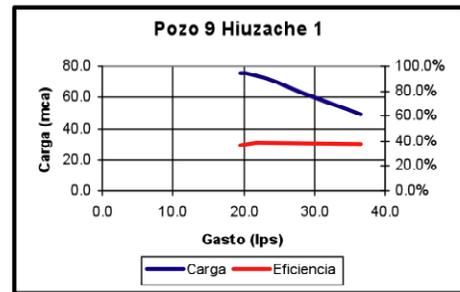
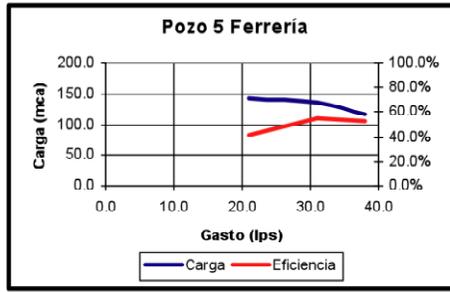
Para construir las curvas $Q-H_b-\eta_b$, es necesario realizar la medición de parámetros hidráulicos y eléctricos en al menos tres a cuatro situaciones de operación de los equipos de bombeo. Para ello, se realiza la modificación de presión de la descarga, estrangulando en un determinado porcentaje la 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, en donde se registran todas las variables eléctricas e hidráulicas que serán procesadas para construir las curvas respectivas.

Un ejemplo del consolidado de mediciones para este fin y el resultado en equipos reales se muestran en la tabla 30 y en la figura 30.

EQUIPO	MEDICIONES				CÁLCULOS	
	Gasto (lps)	Presión (kg/cm ²)	Nivel dinámico (m)	Potencia Eléctrica (kW)	Carga (mca)	Eficiencia (%)
Pozo 5 Ferrería	38,0	4,2	75,0	83,0	117,0	52,5%
	31,0	6,2	74,0	75,0	136,0	55,1%
	21,0	7,0	73,5	71,0	143,5	41,6%
Pozo 9 Huizache 1	36,5	0,7	42,0	46,0	49,0	38,1%
	21,8	3,2	42,0	41,0	74,0	38,6%
	19,5	3,4	42,0	40,0	76,0	36,3%
Pozo 24 López Portillo	47,0	2,6	70,0	94,0	96,0	47,1%
	30,0	7,8	58,0	63,0	136,0	63,5%
	24,0	9,0	50,0	57,0	140,0	57,8%
Pozo 46 Secundaria Benito Juárez	56,0	3,7	47,0	83,0	84,0	55,6%
	34,0	9,0	44,0	89,0	134,0	50,2%
	18,0	11,8	42,0	81,0	160,0	34,9%
Pozo 59 Azcapotzalco	35,0	0,8	92,0	82,0	100,0	41,9%
	23,0	3,7	90,0	82,0	127,0	34,9%
	10,0	6,2	89,0	80,0	151,0	18,5%
Pozo 2 Gabino Santillán	36,5	0,0	59,0	62,0	59,0	34,1%
	27,5	4,3	59,0	69,0	102,0	39,9%
	12,5	7,8	50,0	69,0	128,0	22,7%
	5,5	9,0	50,0	71,0	140,0	10,6%
Pozo 31 Joyas del Valle	19,0	0,5	37,0	30,0	42,0	26,1%
	13,0	0,9	35,5	30,0	44,5	18,9%
	2,4	2,2	31,5	32,0	53,5	3,9%
Pozo 78 San Luis	46,5	1,8	54,0	74,0	71,5	44,1%
	31,0	4,0	50,8	71,0	90,8	38,9%
	12,0	7,0	42,0	59,0	112,0	22,3%

TABLA 30 CONSOLIDADO DE MEDICIONES PARA CURVAS Q-HB- η B EN UN ORGANISMO OPERADOR

ILUSTRACIÓN 30
 CURVAS
 REALES H-Q
 EN POZOS DE
 UN
 ORGANISMO
 OPERADOR.
 (EJEMPLO)



7.2.3 Estado de instalaciones eléctricas, sistemas de puesta a tierra y de mantenimiento eléctrico y mecánico

La inspección¹¹ en recorridos de campo para la evaluación de instalaciones eléctricas, sistemas de puesta a tierra y de mantenimiento eléctrico y mecánico considera tres aspectos:

1. Seguridad para el personal que las opera y controla.
2. Seguridad de las propias instalaciones tomando en cuenta que finalmente esto influye en forma determinante en la continuidad del servicio.
3. Verificar aspectos del estado de instalaciones o del mantenimiento que influyen en la eficiencia de los equipos de bombeo.

La inspección en campo del mantenimiento persigue el objetivo de observar en las instalaciones en operación la forma en que se cumplen prácticas y mantenimiento orientadas a prevenir fallas en todos los equipos que forman dicha instalación. Los trabajos de campo contemplados en este capítulo contemplan lo siguiente:

1. Medición de temperaturas en terminales y equipos.
2. Medición de resistencia de puesta a tierra en elementos físicos y eléctricos del sistema de puesta a tierra.
3. Inspección de las instalaciones eléctricas y mecánicas.
4. Medición de la velocidad angular en motores externos.

A continuación se describe en forma detallada en qué consisten estos trabajos.

7.2.3.1 Medición de temperatura en componentes de conexión y equipos electromecánicos

Las mediciones de temperatura son importantes ya que nos pueden dar información adicional sobre el comportamiento, operación y acciones de mantenimiento que deberán ser realizadas en el sistema eléctrico del equipo de bombeo. Las mediciones de temperatura se pueden realizar con un termómetro infrarrojo, que consta de un dispositivo tipo pistola que toma la temperatura del elemento donde se está apuntando dicha pistola, esto se puede observar en la figura 31 a continuación.

ILUSTRACIÓN 31 MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN TERMINALES DE INTERRUPTOR PRINCIPAL EN EL CCM.



¹¹ El respaldo para este trabajo de campo es la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2005, "Instalaciones eléctricas (utilización)", Actualizada en Mayo de 2013 como NOM-001-SEDE-2012 con la cual se debe cumplir obligatoriamente, y que tiene por fin garantizar los primeros dos puntos señalados.

Se deberán tomar mediciones de temperatura en los siguientes elementos.

7.2.3.2 *Medición de temperatura en el equipo de control*

Las mediciones de temperatura en el equipo de control se realizan para determinar posible sobrecarga de corriente en conductores, o una falta de ajuste de los tornillos o elementos de sujeción de las terminales de los conductores. Para esto deberá tomarse medición de temperatura en los siguientes elementos del equipo de control:

- **Entrada al Interruptor.**- Tomar la medición de temperatura en las terminales de los conductores que vienen del transformador al interruptor principal en cada una de las fases (A, B, y C).
- **Salida del Interruptor.**- Medir la temperatura en las terminales de salida del interruptor principal hacia el motor en cada una de sus fases (A, B y C).
- **Entrada al Arrancador.**- Medir la temperatura de las terminales en los conductores de entrada al arrancador en cada una de sus fases (A, B y C).
- **Salida del Arrancador.**- Medir la temperatura de las terminales de los conductores que salida que van hacia el motor en el arrancador, en cada una de sus fases (A, B, y C).

7.2.3.3 *Medición de temperatura en el motor*

La medición de temperatura en el motor puede determinar falta de mantenimiento en el motor, una sobre carga del mismo, o rozamiento o inestabilidad de las flechas. Para el motor se deberán tomar las mediciones de temperatura en los siguientes elementos.

- **Carcasa.**- Medir la temperatura en la carcasa del motor.
- **Rodamientos.**- Se debe medir la temperatura en los rodamientos o elementos rotativos del motor, es decir al inicio de la flecha (Sup.) y al final de la flecha (Inf.).

7.2.3.4 *Medición de temperatura en el transformador*

Al igual que en el equipo de control las mediciones de temperatura se realizan para determinar posible sobrecarga de corriente en conductores, o una falta de ajuste de los tornillos o elementos de sujeción de las terminales de los conductores en el transformador, así como la falta de mantenimiento del transformador. Para esto deberá tomarse medición de temperatura en los siguientes elementos del transformador.

- **Bornes Alimentador.**- Medir la temperatura en las terminales o bornes del alimentador de la acometida principal del servicio de energía eléctrica que conecta con el transformador, es decir en el lado de alta tensión en cada una de sus fases (X1, X2, y X3).
- **Bornes de Baja Tensión.**- Medir la temperatura en las terminales de salida del transformador, es decir en las terminales de baja tensión, tanto en la terminal de conductor neutro (X0), como en cada una de las fases (X1, X2, y X3).
- **Bote.**- Medir la temperatura del bote del transformador en la parte superior y en la parte inferior. Esta medición ayuda a determinar la temperatura del trabajo del transformador y determinar una posible sobrecarga.
- **Radiador.**- Medir la temperatura en el radiador del transformador, siempre y cuando el tipo de transformador tenga este elemento; las mediciones deberán hacerse tanto en la parte superior como

en la inferior del radiador. Esta medición determina de manera indirecta el diferencial de temperatura del aceite del transformador.

Para el registro de las temperaturas obtenidas se puede utilizar el formato mostrado en la tabla 27 mostrada en el capítulo 7.2.2.8 anterior.

7.2.3.5 Medición de resistencia de puesta a tierra en elementos físicos y eléctricos del sistema de puesta a tierra

Los sistemas de puesta a tierra,¹² se deben usar en los sistemas y conductores eléctricos para limitar las sobre tensiones eléctricas debidas a descargas atmosféricas, transitorios en la red o contacto accidental con líneas de alta tensión, y para estabilizar la tensión eléctrica a tierra durante su funcionamiento normal. Los conductores de puesta a tierra de los equipos se unen al conductor puesto a tierra del sistema para que ofrezcan un camino de baja impedancia para las corrientes de falla, y que faciliten el funcionamiento de los dispositivos de protección contra sobre corrientes en caso de falla a tierra. El objeto de esta medición es comprobar la conectividad de las conexiones de puesta a tierra de los equipos eléctricos y de las partes y/o estructuras metálicas que no conduzcan normalmente corriente eléctrica, mediante el valor de resistencia a tierra obtenido. Un valor igual en todos los puntos comprueba la interconexión de todos los sistemas cumpliendo con lo ordenado por la NOM-001-SEDE.¹³

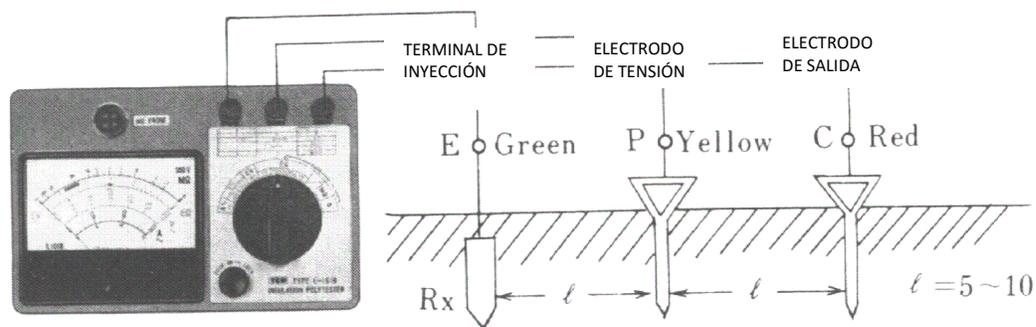
Para realizar esta medición es necesario utilizar un medidor de resistencia a tierra (meggeer). El procedimiento es el siguiente:

1. Se fijan los electrodos (varillas) de retorno de corriente y de medición de tensión procurando que el primero sea el más retirado de los puntos a medir y que el segundo se tenga retirado del primero por lo menos una distancia de 4 m, y siempre más cercano a los puntos a medir (ver figura 32).
2. Se conectan los electrodos a los bornes designados en el equipo de medición mediante los cables proporcionados con el propio equipo y el tercer borne que es la inyección de corriente a tierra se va colocando en el punto de prueba o que se desea medir (se puede emplear un cable de calibre 14 o 12 como extensión para alcanzar puntos más lejanos)
3. El valor de resistencia aparece directamente en pantalla y debe ser anotado en el formato (ver tabla 31).

¹² Como lo señala la NOM-001-SEDE-2005, Actualizada en Mayo de 2013 como NOM-001-SEDE-2012, Art. 250

¹³ Actualizada en Mayo de 2013 como NOM-001-SEDE-2012.

ILUSTRACIÓN 32
ESQUEMA
DESCRIPTIVO
DE MEDICIÓN
DE
RESISTENCIA
DE LA RED DE
TIERRAS



Si se obtienen valores diferentes significa que las conexiones de puesta a tierra no están trabajando correctamente, es decir, que para sobretensiones y fallas en el sistema eléctrico; no se garantiza el disparo u operación en forma correcta de las protecciones, así mismo ante una falla de sobre corriente o descarga atmosférica se puede tener riesgo de electrocutamiento del personal si se encuentra en contacto con algún elemento físico metálico de las instalaciones.

PRUEBA DE CONTINUIDAD SISTEMA DE TIERRAS								
			Medición					
			Ω_1	Ω_2	Voltaje	Calibre	Observaciones	
Hay red de tierras en subestación?	SI	NO						
Están unidos el neutro y la tierra?	SI	NO						
Está aterrizado el transformador?	SI	NO						
Está aterrizado el Tablero eléctrico	SI	NO						
En el tablero existe barra de tierra s	SI	NO						
Está aterrizado el motor?	SI	NO						
Está aterrizado el ademe?	SI	NO						
Está aterrizada la tubería (tren de d	SI	NO						

TABLA 31 FORMATO DE REGISTRO DE MEDICIONES DE RESISTENCIA EN LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.

7.2.3.6 Inspección de instalaciones eléctricas y mecánicas

En la inspección de las instalaciones eléctricas se contemplan todas las instalaciones eléctricas. Desde la acometida con el organismo suministrador hasta el motor eléctrico del equipo de bombeo.

La inspección de instalaciones eléctricas comprende las revisiones de los puntos siguientes:

- Valores de las protecciones.
- Los conductores, características y calibre.
- Las canalizaciones.
- Los equipos de control.

➤ Las instalaciones de media tensión.

En cuanto a la inspección de instalaciones mecánicas, se refiere a la revisión de los elementos mecánicos, que contempla el estado físico de las instalaciones de bombeo, ensamble, lubricación y vibraciones que denotan la operación y mantenimiento del equipo de bombeo y tren de descarga. Es importante recalcar que algunos elementos no podrán ser evaluados cuando se trata de equipo de bombeo tipo sumergible, sin embargo esta inspección si aplica para todos los equipos de bombeo tipo turbina vertical con flecha, y de motor con bomba tipo horizontal. En esta inspección se deberá revisar un listado guía donde se marcan y se anotan las condiciones de cada una de las componentes y sus observaciones. Es recomendable que adicionalmente al marcado del listado de inspección se tome fotografía de la componente o sistema inspeccionado donde se vea claramente las observaciones que se tengan sobre la misma.

En las tablas 32 y 33 siguientes, se muestra a manera de listado las componentes a revisar en la inspección, tanto de las instalaciones eléctricas como de las mecánicas.

Sistema	Equipo	Acción a Revisar	Si	No	NA	Observaciones
Eléctrico	Acometida y Transformador	Acometida en media tensión cables en buen estado.				
		Apartarrayos están conectados correctamente a tierra				
		Las cuchillas fusible están limpias				
		Cuenta con fusibles correctamente instalados				
		Radiadores de transformador limpios				
		Existe escurrimiento de Aceite				
		Aisladores libres de polvo				
		Conexiones de alta tensión firmes y correctas				
		Conexiones de baja tensión firmes y correctas				
		En subestación está limpio el piso y no hay objetos ajenos a la subestación				
		Lectura del máximo nivel de temperatura alcanzada por el transformador				
	Los equipos en subestación compacta cuenta con candado de seguridad.					
Centro de Control de Motores	Puertas y gabinetes de tableros cerradas y en buen estado (sin					

Sistema	Equipo	Acción a Revisar	Si	No	NA	Observaciones
	Conexiones y Canalizaciones	perforaciones destapadas)				
		Las tuberías y canalizaciones están firmes y en buen estado. Describir el tipo de canalización y material				
		Las conexiones o empalmes al motor están correctamente aisladas y protegidas (solo motores externos)				
		Por las canalizaciones se lleva un cable desnudo en conjunto con los conductores de corriente.				
		Interior de gabinetes y tableros libres de polvo				
		Conexiones en el interruptor firmes y limpias				
		Conexiones en el arrancador firmes y limpias				
		Los interruptores se encuentran limpios y en buen estado				

TABLA 32 LISTADO PARA LA INSPECCIÓN DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS.

Sistema	Equipo	Acción a Revisar	Si	No	NA	Observaciones
Mecánico	Motores eléctricos	Las tuercas y tornillos de fijación apretados				
		Existe escurrimiento de grasas o aceites				
		El acoplamiento, en su caso, está en correcto estado				
	Bombas Verticales y	Las chumaceras están				

Horizontales	correctamente lubricadas				
	Existen fugas en las juntas				
	Existe deterioro en sello mecánico				
	La flecha presenta vibración o desplazamientos				
Tren de descarga	Hay ruido excesivo en la tubería de descarga				
	Existen fugas en las juntas				

TABLA 33 LISTADO PARA LA INSPECCIÓN DE INSTALACIONES MECÁNICAS

Es sumamente importante anotar claramente las observaciones realizadas en los elementos donde se tenga alguna anomalía. Esta inspección es muy importante ya que en el proceso de análisis de la eficiencia de los equipos de bombeo, ayudarán sin duda a prevenir paros inesperados o costos excesivos de mantenimiento.

7.2.3.7 *Medición de velocidad angular (rpm) en motores externos.*

Las rpm (revoluciones por minuto) en la flecha de un motor eléctrico se puede realizar mediante un contador de vueltas y un cronómetro, o un tacómetro mecánico que las mide directamente, o un tacómetro fotoeléctrico que mide los pulsos de luz reflejada por la señal o marca existente. Si se emplea cuenta vueltas o tacómetro mecánico debe estar descubierto un punto central de la flecha para colocarlo, en el caso del fotoeléctrico se coloca una marca de reflejante sobre una parte visible que esté girando del motor y el aparato indica directamente las rpm. La figura 33 muestra un ejemplo de este tipo de instrumento de medición.

ILUSTRACIÓN 33 EJEMPLO DE TACÓMETRO FOTOELÉCTRICO Y DE CONTACTO.



7.2.3.8 Aplicación de las rpm para obtener la potencia real entregada en la flecha de un motor

Basados en el fundamento de que la potencia es igual al par motor por la velocidad de rotación, y que en un motor eléctrico tipo de inducción, el par es resultado de las características eléctricas de tensión y corriente (variables y/o distintas a las nominales de un motor), que aplicadas al embobinado y dependiendo de las características constructivas del motor las cuales son constantes, crean el campo magnético que produce el par motriz, que a su vez depende del deslizamiento del rotor, es decir, las rpm de sincronismo según el número de polos menos las rpm de trabajo.

La velocidad de sincronismo depende del número de polos de motor y se determinan de acuerdo a la siguiente tabla 34.

No de Polos en la placa del motor	rpm de sincronismo
2	3600
4	1800
6	1200
8	900

TABLA 34 VELOCIDAD DE SINCRONISMO EN MOTORES DE 60 HZ DE ACUERDO A LOS POLOS DEL MOTOR

La placa de un motor muestra la potencia nominal máxima con las rpm a las que entrega dicha potencia, de este valor se obtiene el deslizamiento específico de dicho motor, de acuerdo a lo siguiente:

$$\text{Deslizamiento específico} = \text{rpm sincronismo} - \text{rpm de la placa del motor}$$

Basados en el fundamento señalado anteriormente las rpm medidas nos permiten obtener el deslizamiento actual,

$$\text{Deslizamiento actual} = \text{rpm sincronismo} - \text{rpm medidas}$$

La proporción entre el deslizamiento específico y el deslizamiento actual multiplicado por la potencia de la placa del motor da como resultado la potencia real entregada en ese instante por la flecha del motor de acuerdo a lo siguiente:

$$P_f = \frac{\text{Deslizamiento actual (rpm)}}{\text{Deslizamiento nominal (rpm)}} \times CP_{\text{placa del motor}}$$

Donde:

P_f = Potencia en la flecha del motor en kW

CP = Potencia de la placa del motor en kW

De acuerdo a esto, se puede obtener de forma directa la eficiencia de un motor eléctrico dividiendo potencia real entregada en la flecha del motor (P_f), entre la potencia eléctrica usada por el motor (P_m). Se debe tomar en cuenta que la potencia usada por el motor es la potencia eléctrica medida de acuerdo al capítulo 7.2.2.4 menos las pérdidas generadas en los elementos eléctricos, principalmente en los conductores, desde el punto de medición hasta la conexión con el motor.

$$\eta_m = \frac{P_f}{P_m}$$

7.2.4 Estado de mantenimiento y capacidad de producción de pozos

La producción de agua potable en la mayoría de los organismos operadores, es a través de los pozos profundos. Es por esto que es de vital importancia realizar un análisis general, tanto de los niveles del acuífero como del estado que guardan los pozos, y de esta manera determinar la capacidad de producción de los mismos, o en su caso, medidas que permitan su aprovechamiento de forma óptima. Este análisis es esencial como base para realizar el estudio de eficiencia hidráulica, donde se deberá tomar en cuenta la capacidad de producción de los mismos en el análisis de redistribución de caudales.

De acuerdo a lo anterior, es indispensable realizar dos tipos de trabajo de campo:

- a) Medición del nivel estático y elaboración de la curva de abatimiento del pozo
- b) Realiza una inspección del estado de los elementos que conforman el pozo

A continuación se describe detalladamente en qué consisten estos trabajos.

7.2.4.1 Medición de nivel estático y elaboración de la curva de abatimiento del pozo

Para construir la curva de abatimiento de un pozo se debe partir de los datos obtenidos para la elaboración de curvas de operación de los equipos de bombeo vista en el capítulo 7.2.2.9 realizando la medición de parámetros hidráulicos y eléctricos en al menos tres a cuatro situaciones de operación cuando éstos se realizan en los equipos de bombeo de los pozos, tomando las columnas Gasto y Nivel Dinámico de la tabla 2.10.

Adicionalmente al Gasto y Nivel Dinámico se debe realizar el paro de equipo y se recomienda dejar pasar un periodo de 30 a 40 minutos para la recuperación del nivel estático del pozo. Una vez transcurrido este periodo, se debe obtener la lectura del Nivel Estático (NE).

Con estos datos se construye la curva de abatimiento del pozo de acuerdo a lo mostrado en la tabla 35 siguiente:

Medición	Gasto (lps)	Nivel del agua en el pozo (m)	Abatimiento (m)	Coficiente de utilización del pozo (lps/m)
0	0.0	27.30	0.0	0.0
1	16.8	30.30	3.00	5.60
2	19.5	30.90	3.60	5.42
3	27.5	32.55	5.25	5.24

TABLA 35 TABLA DE CÁLCULO PARA CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE ABATIMIENTO DE UN POZO

El nivel estático NE es el primer dato de la tabla.

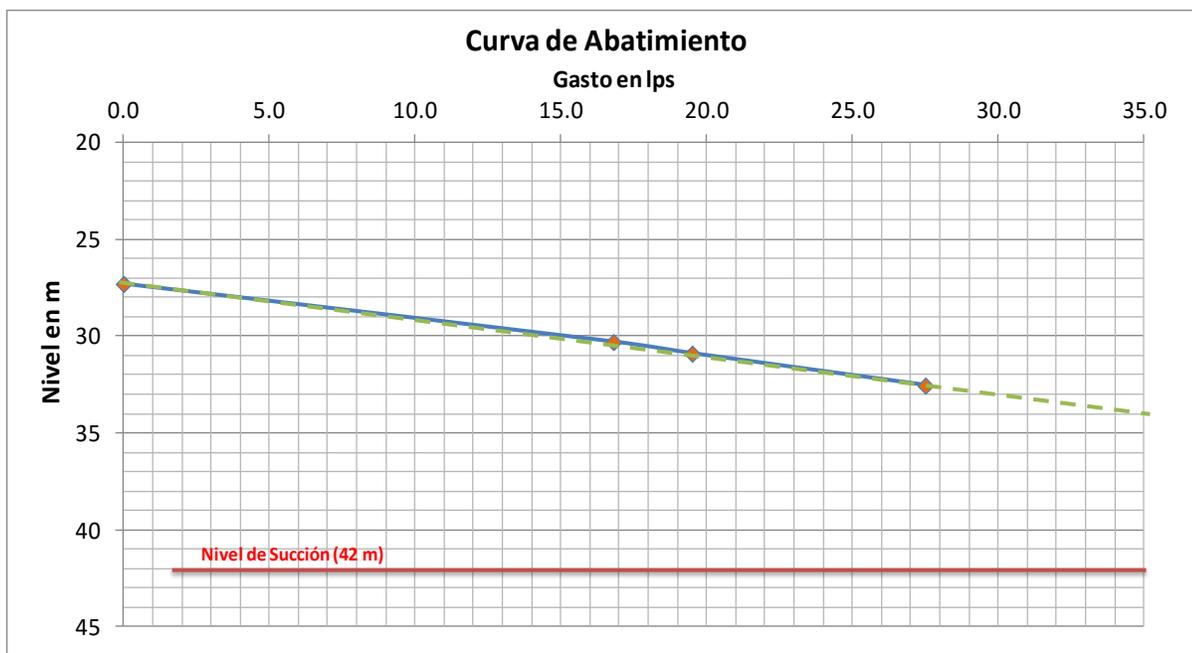
El Abatimiento se calcula restando el nivel del agua en el pozo en la medición (i) menos el nivel del agua en el pozo en la medición (i-1).

El coeficiente de utilización, que es un indicador del caudal que se extrae del pozo por cada metro de abatimiento se calcula dividiendo el gasto de extracción entre el abatimiento, de acuerdo a la siguiente fórmula.

$$CUP = \frac{Q_i}{Abatimiento_i}$$

Con los datos de la tabla 35 se puede construir la curva de abatimiento del pozo, según se muestra en la figura 34.

ILUSTRACIÓN
34 EJEMPLO
DE LA CURVA
DE
ABATIMIENTO
DE UN POZO



En la figura 34 se observa en la línea azul la curva de abatimiento del pozo de acuerdo a las mediciones descritas en la tabla 35. La pendiente en cada tramo de la curva es entonces el Coeficiente de Utilización del pozo para el gasto de extracción medido. En este caso en particular se observa que el coeficiente de utilización no presenta variaciones importantes, es decir, que la pendiente de la curva permanece constante (línea punteada), esto quiere decir que el abatimiento es proporcional a la recuperación del pozo y por lo tanto este pozo se encuentra en buenas condiciones.

De esta manera la curva de abatimiento y el coeficiente de utilización en un pozo permiten realizar un análisis del estado de la fuente de abastecimiento y el rango permitido del gasto de extracción permitido por el mismo, de acuerdo a las condiciones actuales del pozo.

El análisis del resultado de la curva de abatimiento y el coeficiente de utilización de los pozos debe ser tomado en cuenta para el Proyecto de Eficiencia Hidráulica el cual se explicará en el capítulo 9.2 del presente manual.

7.2.4.2 Inspección del estado de los elementos que conforman el pozo.

De igual forma que se realiza la inspección del estado que guardan las instalaciones eléctricas y mecánicas, se debe realizar una inspección del estado que guardan los elementos del pozo, que comprenden todos los que se encuentran a la vista y que denotan el cumplimiento con la NOM-003-CNA, así como los adecuados para la observación de su comportamiento y operación normal.

En la tabla 36 se muestra un listado de los puntos que se deben inspeccionar en los elementos que conforman el pozo o fuente de captación.

Sistema	Equipo	Acción a Revisar	Si	No	NA	Observaciones
Elementos del Pozo	Ademe Pozo	El área que rodea el emplazamiento del pozo está libre de instalaciones contaminantes en un radio mínimo de 30 m				
		Ademe para protección del pozo en buenas condiciones				
		Existe una sobre elevación del ademe por encima del nivel del suelo. (Anotar medición de la sobre elevación)				
		El Cedazo o rejilla se encuentran en buenas condiciones				
		Existe Filtro granular y engravadores				
		Existe Contraedme.				
		Existe plantilla de concreto al rededor del pozo. Tipo y dimensiones				

		de la plantilla				
		Existe brocal en el pozo, anotar tipo de brocal y dimensiones				
		Tomar muestra en recipiente transparente del tren de descarga por toma lateral. Esta muestra presenta sólidos o arenas.				
		Cuenta con toma lateral para obtención de muestra de agua				
		Tiene dispositivo fijo para medición de niveles en el pozo o fuente				

TABLA 36 LISTADO DE PUNTOS A INSPECCIONAR EN LAS COMPONENTES DE UN POZO PROFUNDO

De igual forma que se hizo en la inspección de instalaciones eléctricas y mecánicas, se recomienda realizar esta inspección cuidadosamente tomando fotografías claras de los puntos que se inspeccionan. Los resultados de esta inspección son importantes ya que su análisis podría determinar no solo algunas causas de ineficiencia, o la explicación de la forma y tendencia de la curva de abatimiento de los pozos, sino que permite detectar posibles puntos de incumplimiento con la norma NOM-003-CNA¹⁴ y realizar las acciones correctivas necesarias.

¹⁴ *Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos*

Capítulo 6

Eficiencia Física

8 Eficiencia física

8.1 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 (CNA, 2005)¹⁵, como:

$$\eta_{fís} = \frac{Vol_{cons}}{Vol_{suministrado}} \times 100$$

ECUACIÓN 33

El volumen consumido ($Vol_{consumido}$) es la cantidad de agua, medida o no (cuota fija), que reciben los usuarios en sus tomas, registradas o no. El volumen suministrado ($Vol_{suministrado}$) es la cantidad de agua producida e introducida a la red.

El valor de la eficiencia física determinada con la ecuación 33 refleja en buena medida la capacidad que tiene un sistema de abastecimiento para entregar el agua inyectada a la red hasta los usuarios y la magnitud del volumen de las fugas existentes. Sin embargo, el valor de la eficiencia física no manifiesta de manera exacta el nivel de deterioro de las tuberías, 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 *Índice de Fugas Estructural* (IFE) que se calcula mediante la ecuación 34.

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

ECUACIÓN 34

Donde:

- VIF = Indicador del volumen de fugas (m^3 /toma/día).
- UMF = Umbral mínimo de fugas (referencia óptima) (m^3 /toma/día).
- 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.

¹⁵ Comisión Nacional del Agua, 2005, *Planeación de acciones de incremento y control de eficiencia en sistemas de agua potable*, Subdirección de Infraestructura Urbana, México, D.F.

A, B y C = Constantes que ponderan la variable que acompañan y que han sido determinadas con un análisis estadístico de 20 países¹⁶; A=18, B=0.8, C=25.

Long_r = Longitud total de las tuberías 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.c.a.).

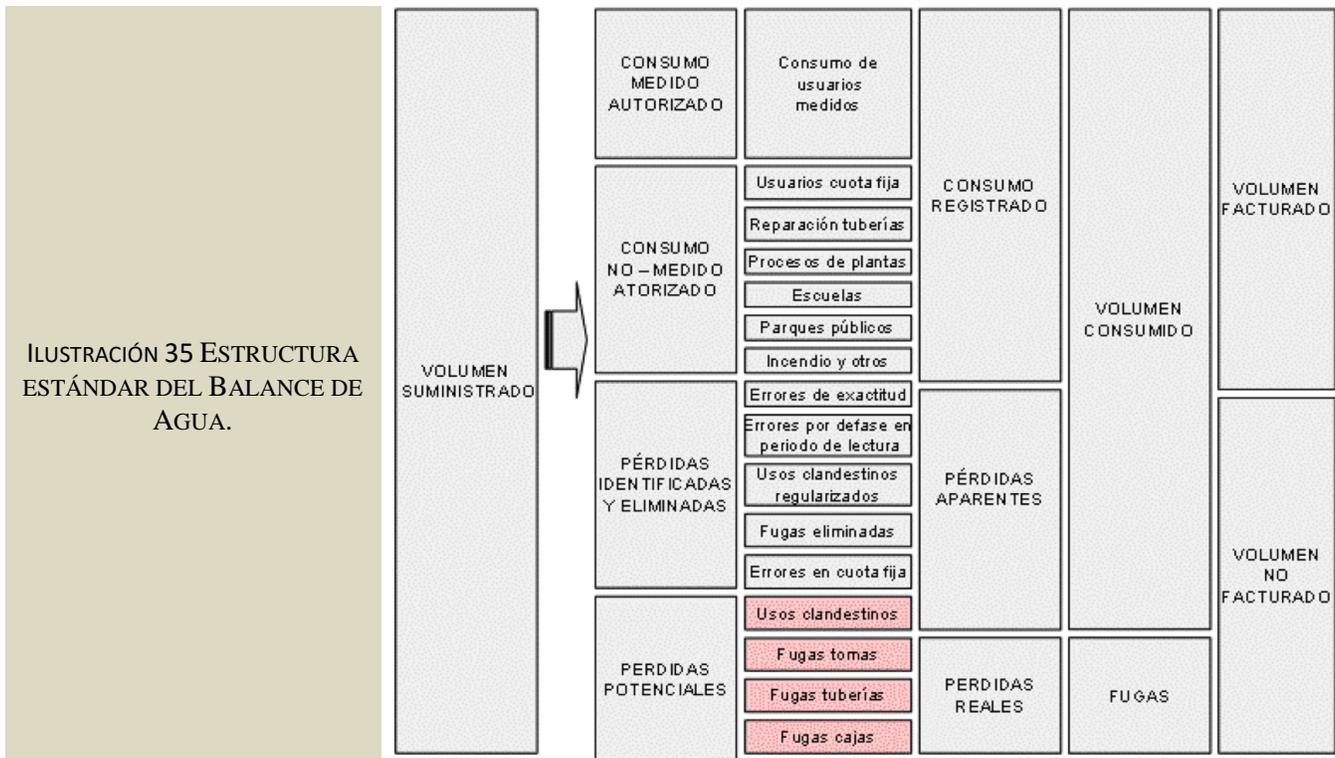
Un valor del IFE igual a uno, deberá ser interpretado como el estado físico óptimo deseable en una red de abastecimiento. En la medida en que este valor se incrementa, se interpreta que la red se encuentra más deteriorada.

El objetivo del diagnóstico de eficiencia física es precisamente determinar los valores del indicador de eficiencia de la ecuación 33 y del Índice de Fugas Estructural (IFE) de la ecuación 34, 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 el capítulo 8.2 de este manual.

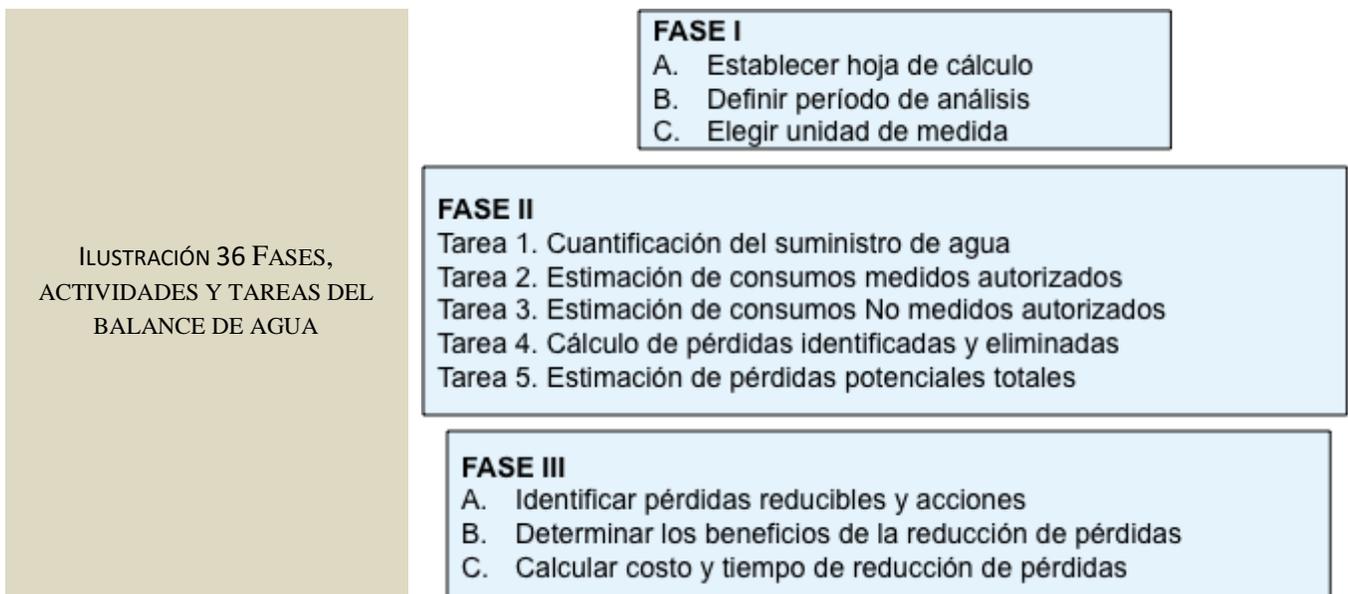
El diagnóstico de la eficiencia física de un sistema de agua potable se elabora con base en el Balance de Agua, que es una técnica para auditar detalladamente la forma de administrar el suministro y el consumo de agua de un sistema de agua potable y discriminar las pérdidas reales de las aparentes. En la figura 35 se presenta la estructura del balance de agua¹⁷.

¹⁶ Wallace, 1987, *Water and Revenue Losses: Unaccounted for Water* AWWA, Research Report Fundation

¹⁷ 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, AMH, Toluca, México.



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 en la figura 36.



Enseguida se presenta una descripción de los procedimientos que deben seguirse para elaborar un balance de agua potable, según las fases I, II y III y las tareas mencionadas.

8.1.1 Hoja de cálculo, periodo de análisis y unidad de medida

En el **Anexo C** de este manual 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, pero con la advertencia de que los resultados serán menos exactos. Se recomienda utilizar y convertir todos los datos para el cálculo en metros cúbicos (m³).

8.1.2 Tarea 1. 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 coleccionan, revisan y ordenan los registros históricos de volúmenes de agua producida, por mes y por cada una de las captaciones, utilizando un cuadro similar al presentado en la tabla 37, y en donde las celdas amarillas indican los datos capturados y las celdas verdes los valores calculados.

MES	CAPTACION CON MACROMEDIDOR FUNCIONANDO					TOTAL
	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	...	Pozo n	
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 37 EJEMPLO DE VOLÚMENES DE AGUA PRODUCIDA EN UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO URBANO

Estas cantidades representan volúmenes no-correctados de agua suministrada en el periodo, puesto que existen factores que ocasionan errores en los registros, por ejemplo:

- Macromedidores inexactos.
- Cambios de almacenamiento de 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 sumatoria de ajustes parciales por error de macromedición, almacenamiento en tanques, fugas, captaciones sin medidor o sin registros, etc.

8.1.2.1 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 realizará según las especificaciones y recomendaciones señaladas en el capítulo 7.2.1.2 y 7.2.1.3 de este manual.

La fórmula para calcular la estimación del volumen producido (en m³) en cada captación es la siguiente, ecuación 35.

$$Vol_{estap} = \sum_{i=1}^m 86.4 * Q_{mi} * \left(\frac{t_{OAi}}{24} \right) Pes_{bal}$$

ECUACIÓN 35

Donde:

- Vol_{estap} = Volumen estimado total de agua producida (m³/año).
- Q_m = Caudal medio registrado en el equipo portátil (l/s).
- t_{OA} = Tiempo de operación anual de la captación (h/año).
- Pes_{bal} = Periodo de análisis del balance (días).
- i = Captación en turno.
- m = Número total de captaciones en el sistema de agua potable.

8.1.2.2 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 del capítulo 2.2.1.4 del manual.

8.1.2.3 Corrección de volúmenes de producción por cambio de reservas en tanques

Se deben detectar cambios en las reservas de los tanques los cuales se calculan con la fórmula 36.

$$Vol_A = \sum_{j=1}^{mt} Vol_{it} * Vol_{ft,j}$$

ECUACIÓN 36

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.

8.1.3 Tarea 2. Estimación de consumos medidos autorizados

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

El volumen mensual medido y autorizado total por tipo de uso se registra en una tabla como la mostrada en la tabla 38.

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	84,656	5,749,080

TABLA 38 EJEMPLO DE CONSUMOS MEDIDOS AUTORIZADOS SIN CORREGIR (M3)

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.

8.1.4 Tarea 3. 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 3.3.

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

TABLA 39 EJEMPLO DE CONSUMOS DE USUARIOS CON CUOTA FIJA.

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, por lo que deberá calcularse este error como se describe en el capítulo 7.2.1.6 de este manual. Además de los volúmenes de usuarios con cuota fija, existen otros consumos de agua sin medición que están autorizados por el organismo operador, como por ejemplo:

- Vaciados en las reparaciones de tuberías.
- 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 en lo posible ser cuantificados en el mismo periodo de análisis del balance de agua con el fin de afinar los resultados de las pérdidas potenciales de agua en el sistema. El procedimiento de cálculo a detalle sugerido se puede consultar en el libro *Reducción Integral de Pérdidas de Agua Potable*¹⁸. De cualquier manera, en el formato del balance de agua incluido en el anexo de este manual, se incluyen los cuadros de cálculo correspondientes.

8.1.5 Tarea 4. 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.

Hay 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 que, si existen datos estadísticos en el organismo operador, pueden estimarse para tener mayor precisión en el balance de agua. 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, por lo que enseguida se describen los procedimientos para estimarlos.

8.1.5.1 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 el capítulo 7.2.1.6 de este manual. 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, por lo general basta con realizar un muestreo para usuarios domésticos y otro para 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 37.

¹⁸ Ochoa A.L. y Bourguett, O.V. , 1998, *Reducción Integral de Pérdidas de Agua Potable*, Editado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, Jiutepec, Morelos, México

$$Volumendeajuste = \frac{Vol_{masc}}{\left(1 + \frac{Err_m}{100}\right)} - Vol_{masc}$$

ECUACIÓN 37

Donde:

Vol_{masc} = Volumen consumido medido total autorizado sin corregir (m³).

Err_m = Error de exactitud del micromedidor (%).

ILUSTRACIÓN 37



8.1.5.2 Consumo de agua por desfase en periodos de lectura de medidores

Es común que el período 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 con las fórmulas 38 a 40.

$$Vol_{ip} = Vol_{map} \frac{D_{tl}}{nD_{map}}$$

ECUACIÓN 38

Donde:

Vol_{ip} = Volumen de consumo de agua ajustado para el inicio del periodo (m³).

Vol_{map} = Volumen de consumo de agua contabilizado en el mes anterior al periodo (m³).

D_{tl} = Día del mes de la toma de lecturas (día).

nD_{map} = Número de días del mes anterior al periodo (días).

$$Vol_{fp} = Vol_{ump} \frac{nD_{ump} - D_{tl}}{nD_{ump}}$$

ECUACIÓN 39

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).

D_{tl} = Día del mes de la toma de lecturas (día).

$$Vol_t = Vol_{ip} + Vol_{fp} - Vol_{ump}$$

ECUACIÓN 40

Donde:

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

Vol_{ip} = Volumen de consumo de agua ajustado para el inicio del periodo (m^3).

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).

8.1.5.3 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 sus 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 40 se muestra un ejemplo de la forma de registrar estos volúmenes de pérdidas identificadas por usos fraudulentos y clandestinos regularizados.

Zona Socioeconómica	No. Conexiones descubiertas	Consumo promedio antes de su detección (m3/mes)	Consumo promedio de la zona (m3/mes)	No. Meses que estuvieron ocultas	Volumen de agua por usos clandestinos regularizados (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

TABLA 40 EJEMPLO DE PÉRDIDAS POR USOS Y FRAUDULENTOS Y CLANDESTINOS REGULARIZADOS.

8.1.5.4 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 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 balance, es recomendable clasificarlas en fugas ocurridas en tomas domiciliarias, en tuberías 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 a 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 a los diámetros de las tuberías 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 pérdida con la fórmula 41. El registro de estas estimaciones puede concentrarse como se muestra en la tabla 41.

$$Vol_{fr} = n_f * Q_f * t_f * 0.0864$$

ECUACIÓN 41

Donde:

Vol_{fr} = Volumen de fugas reparadas (m³).

n_f = Número de fugas reparadas.

Q_f = Caudal promedio de fugas (mml/s).

t_f = Tiempo promedio de permanencia de las fugas, desde el inicio del periodo del balance de agua hasta ser reparada (días).

0.0864 = Coeficiente de conversión de mml/s a m³.

FUGAS IDENTIFICADAS Y REPARADAS				
FUGAS EN TOMAS DOMICILIARIAS				
Zona de presión de la ciudad (kg/cm ²)	No. Fugas reparadas	Gasto promedio de fuga (mmL/s)	Tiempo que existió la fuga (días)	Volumen de agua perdida (m ³)
0 - 1	440	35	69	91,809
1.1 - 2	532	60	119	328,189
2.1 - 3	0			0
3.1 - 4	0			0
mas de 4	0			0
TOTAL				419,997

FUGAS EN TUBERÍAS PRINCIPALES Y SECUNDARIAS				
Diámetro del tubo (pulgadas)	No. Fugas reparadas	Gasto promedio de fuga (mmL/s)	Tiempo que existió la fuga (días)	Volumen de agua perdida (m ³)
3, 4 y 6	46	255	80	81,078
8 y 10	24	312	12	7,764
12 a 20	15	714	2	1,851
más de 20	8	1,250	2	1,728
TOTAL				92,420

FUGAS EN CAJAS DE VÁLVULAS				
Tipo de fuga	No. Fugas reparadas	Gasto promedio de fuga (mmL/s)	Tiempo que existió la fuga (días)	Volumen de agua perdida (m ³)
Estopero	3	425	98	10795.68
Junta	0			0
Otro	0			0
TOTAL				10,796

TABLA 41 EJEMPLO DE FUGAS IDENTIFICADAS Y ELIMINADAS

8.1.5.5 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 el capítulo 7.2.1.5 de este manual.

El padrón de usuarios con cuota fija debe subclasificarse por tipos de usuario (domésticos, comercial, industrial, mixtos, 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 las fórmulas 42 y 43.

$$Err_{Cucf} = \frac{Cu_A - Cu_V}{Cu_V} * 100$$

ECUACIÓN 42

Donde:

Err_{Cucf} = Porcentaje de 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).

$$C_{ECF} = \frac{Vol_{ucf}}{1 + Err_{Cucf} / 100} - Vol_{ucf}$$

ECUACIÓN 43

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} = Porcentaje de error de consumo unitario en cuota fija ($\pm \%$).

8.1.6 Tarea 5. Estimación de pérdidas potenciales totales

El volumen de pérdidas potenciales totales es al 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 expresión 44.

$$Vol_{epp} = Vol_{sumacor} - Vol_{mas} - Vol_{nma} - Vol_{peridel}$$

ECUACIÓN 44

Dónde:

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

$Vol_{sumacor}$ = 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 en esta expresión, 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 el capítulo 7.2.1.7 de este manual (estimación del volumen de fugas en tomas domiciliarias y cajas de válvulas).

De igual manera, con los resultados de la vinculación de tomas domiciliarias, señalado en el capítulo 7.2.1.10 se puede estimar el potencial de pérdidas aparentes en el sistema. El resto del volumen de agua corresponderá a las fugas en tuberías principales y secundarias.

Con todos estos resultados se calcula el indicador de eficiencia física del sistema de abastecimiento de agua potable, utilizando la ecuación 33, que con las variables estimadas con el balance de agua, queda como se muestra en la ecuación 45.

$$\eta_{\text{física}} = 1 - \frac{Vol_{\text{eprp}}}{Vol_{\text{sumacorr}}}$$

ECUACIÓN 45

Donde:

- $\eta_{\text{física}}$ = 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. Se considera que valores cercanos al 15% reflejan sistemas de agua potable sin problemas de fugas significantes, por lo que solamente deberán mejorar sus acciones de control. En cambio, si el indicador rebasa el 20% es necesario realizar acciones de eliminación y control de fugas de manera inmediata.

8.1.7 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, o bien, porque su localización no es rentable. Internacionalmente este porcentaje límite es considerado del orden de 15% del volumen de agua total suministrado corregido; no obstante, con base 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 factible y viable es lograr un porcentaje del 20%. Sin embargo, siempre será mejor realizar un análisis para encontrar el punto de equilibrio económico de la reducción de pérdidas¹⁹.

En el caso de las pérdidas aparentes, su regularización puede alcanzar el 100% con un adecuado programa de trabajo sobre actualización del padrón de usuarios y con un sistema de facturación efectivo.

En consistencia, 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.

Entonces, el volumen total de fugas reducible se calcula con la ecuación 46.

¹⁹ Ochoa A. L., "Planeación de acciones de incremento y control de la eficiencia en sistemas de agua potable" Manual técnico, Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana, 2005, México

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

ECUACIÓN 46

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 de suministro total de agua corregido (m³).

En la tabla 42 se presenta un cuadro resumen de pérdidas reducibles clasificadas en fugas de tuberías, tomas domiciliarias y cajas de válvulas.

VOLUMEN DE FUGAS REDUCIBLE PARA ALCANZAR EL 20% DEL VOLUMEN DE SUMINISTRO

Porcentaje límite a reducir (%) =	20.00%
Suministro de agua corregido (m3) =	18,449,483

Tipo de fuga	Volumen de fugas reales potenciales totales (m3)	Porcentaje de volumen de fugas respecto del suministro de agua (%)	Volumen de fugas por reducir para alcanzar el 20% del volumen	Volumen de fugas latentes (m3)	Porcentaje de volumen de fugas latentes respecto a suministro (%)
Tomas domiciliarias	7,243,733	39.26%	4,401,816	2,841,917	15.40%
Tuberías	2,161,407	11.72%	1,313,427	847,980	4.60%
Cajas de válvulas	0	0.0%	0	0	0.00%
Otras fugas	0	0.0%	0	0	0.00%
TOTAL	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

TABLA 42 EJEMPLO DEL CÁLCULO DE VOLÚMENES DE FUGAS REDUCIBLES

Una vez definido el volumen de fugas, se programan las acciones de eliminación y control de fugas, de acuerdo con los criterios establecidos en el Proyecto de Eficiencia Física descrito en el capítulo 8 del manual.

8.1.8 Beneficios de la reducción de fugas

El mayor beneficio directo al reducir las fugas, es el ahorro en costos de producción y distribución de agua, principalmente de energía eléctrica y potabilización.

Los beneficios indirectos al reducir fugas se vinculan al ahorro en costos por:

1. Desfase en construcción de nueva infraestructura de agua y energía eléctrica.
2. Disminución del deterioro de infraestructura existente.
3. Reducción del mantenimiento excesivo.

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

8.1.8.1 Beneficios por ahorro de energía eléctrica por reducción de fugas

Los beneficios por ahorro de energía eléctrica se deben a dos factores: uno debido al ahorro de agua que deja de suministrarse y el otro por 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 el punto 9 del manual). 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 43.

BENEFICIOS POR COSTOS AHORRADOS EN ENERGÍA ELÉCTRICA POR AHORRO DE AGUA			
Kilowatts-hora unitario de energía eléctrica en la producción de agua (Kw-h/m3)			0.4
Costo del Kilowatt-hora promedio (\$) =		1.05	
Tipo de fuga	Agua de fugas reducibles (m3)	Número de Kilowatts- hora ahorrados	Costo de energía eléctrica ahorrada por reducción de agua de fugas (\$)
Tomas domiciliarias	4,401,816	1,760,726	1,848,763
Tuberías	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

TABLA 43 CÁLCULO DE BENEFICIOS DE REDUCCIÓN DE FUGAS EN EL AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

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 utilizar dos programas que tienen licencia libre y son amigables: el más usual es el llamado *Epanet V 2.0* en español, cuyo ambiente es en *Windows* y compatible con *AutoCad*; y uno alternativo es el llamado *AH*, creado por la *Comisión Nacional del Agua* cuyo ambiente es en *MS2*, pero su uso es sencillo. Con estos modelos de simulación hidráulica de redes de distribución se obtienen las cargas dinámicas de bombeo con y sin fugas, de tal manera que las diferencias definirán el ahorro de carga dinámica efectiva. También, con los resultados se calcula la potencia en kilowatts-hora de los equipos de bombeo, igualmente 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.

8.1.8.2 Beneficios por ahorro de potabilización por reducción de fugas

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

8.1.9 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 tuberías:

- 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) (capítulo 3.1.1.7).

Primero se estima el número de fugas por reparar en tomas domiciliarias, cajas de válvulas y tuberías 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 el 20% de fugas latentes se calcula sumando los tres costos anteriores. Es importante mencionar que además de los costos de eliminación o reducción, deberá considerarse un costo por la actividad anual del programa de control de fugas que debe implementar el organismo operador para mantener los niveles de fugas logrados.

El valor de este programa de control de fugas puede determinarse considerando que aproximadamente tiene un costo anual de 35 pesos por cada toma registrada. 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.

8.2 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 el 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 tuberías y de accesorios.

Los elementos de control son del tipo no-estructural 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 micromedición, 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 en el largo plazo, en condiciones de viabilidad técnica, económica, financiera e institucional. Con esta perspectiva, el Proyecto de Eficiencia Física se compone de seis bloques de actividades, como se muestra en la figura 38.

ILUSTRACIÓN 38
BLOQUES DE
ACTIVIDADES
PARA
ELABORAR UN
PROYECTO DE
EFICIENCIA
FÍSICA



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 en la medida en que se involucra a más áreas del organismo operador en su proceso de desarrollo, debido a que éstas contribuyen en 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 adquiridos por el departamento de compras no cumplen con la calidad necesaria; o también porque los usuarios no tienen la suficiente comunicación o cultura para reportar las fugas.

8.2.1 Elaboración de diagnóstico de la situación actual de fugas

El Proyecto de Eficiencia Física se basa en un diagnóstico actual de la situación de fugas en el sistema de abastecimiento. Este diagnóstico se realiza de acuerdo con los lineamientos especificados en el capítulo 8.1 de este manual.

8.2.2 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, contra un marco de referencia definido como el estado óptimo y eficiente.

Esta actividad se realiza en tres partes:

1. Obtención del nivel actual de fugas y causas físicas.
2. Evaluación del estado actual de los subproyectos asociados al control de fugas.
3. Formulación de árboles de problemas de fugas.

8.2.2.1 Obtención del nivel actual de fugas y causas físicas

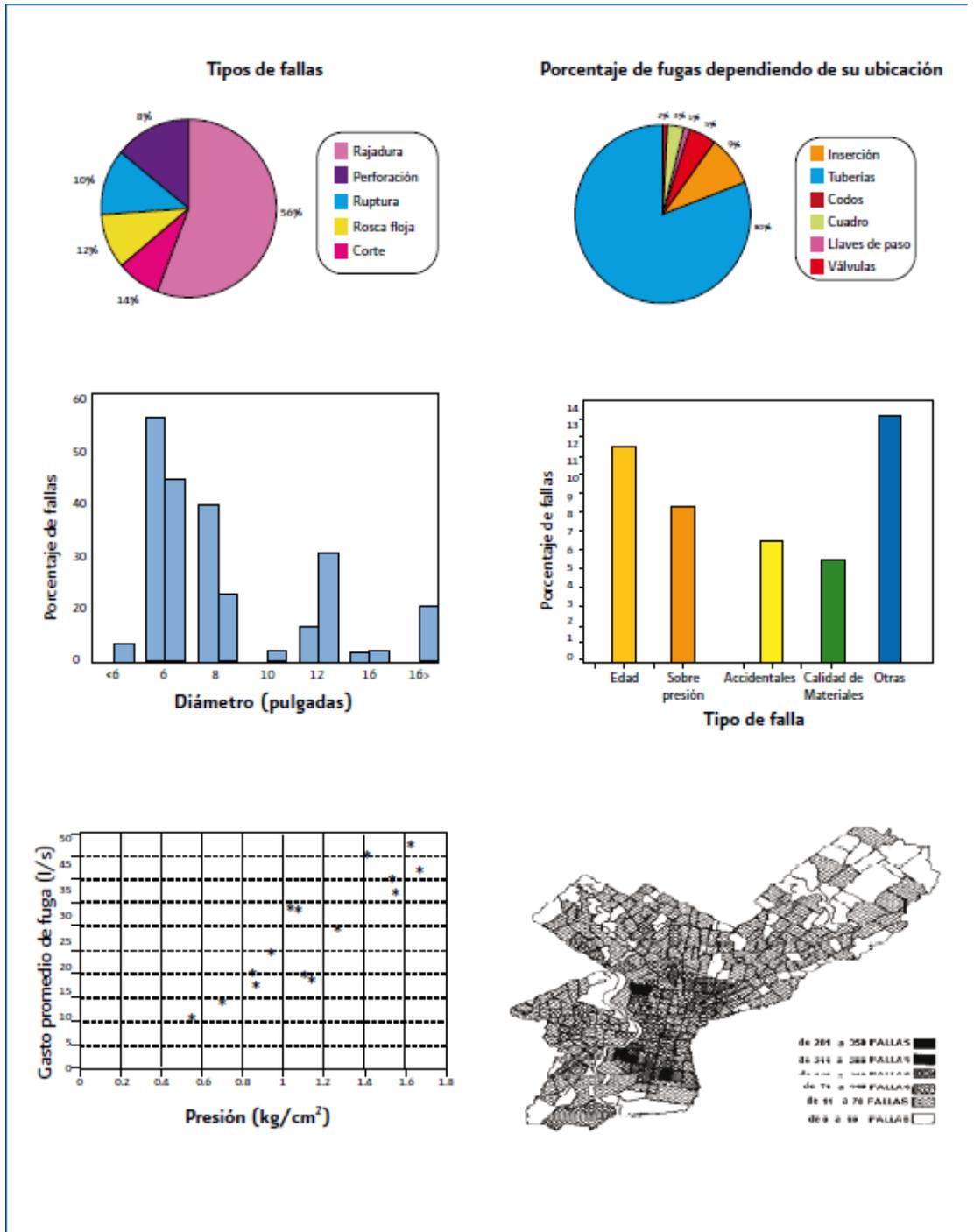
El cálculo del nivel actual de fugas y las causas físicas de su ocurrencia se basa en el balance de agua, ejecutado según el procedimiento especificado en el capítulo 8.1 de este manual, los muestreos de campo del capítulo 7.2.1.7 y las estadísticas históricas con las que cuenta el organismo operador. El nivel de fugas actual debe ser expresado en porcentaje del volumen suministrado anualmente al sistema de agua potable. Se recomienda discriminarlo en fugas en tomas domiciliarias, fugas en cajas de válvulas y fugas en tuberías principales y secundarias.

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:

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

Algunos ejemplos de cómo presentar este análisis se muestran en las figura 39.

ILUSTRACIÓN 39
EJEMPLOS DE
PRESENTACIÓN
DE
ESTADÍSTICAS
DE FUGAS
PARA
IDENTIFICAR
CAUSAS
FÍSICAS DE SU
OCURRENCIA



8.2.2.2 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.**- Con su implementación se facilita la localización de tramos y elementos de la red, reduciéndose así los tiempos de búsqueda en la reparación de fugas, pruebas de aislamiento de distritos hidrométricos y estrategias de rehabilitación de tuberías.
3. **Control operacional.**- Su impulso 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.**- Su promoción 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.
5. **Sectorización de la red.**- Su ejecución trae consigo una redistribución de caudales y presiones en la red y se logra la recuperación de caudales de fuga en forma rentable, rápida y efectiva; además se facilita el monitoreo y control de fugas al realizarlo por zonas aisladas.
6. **Formación de recursos humanos.**- Es fundamental la capacitación y entrenamiento del personal involucrado en las labores de diagnóstico, detección, reparación y control de fugas para impactar en la efectividad y sustentabilidad de las acciones respectivas.
7. **Comunicación y participación social.**- Su desarrollo motiva a los usuarios a tomar conciencia sobre el cuidado del agua y la denuncia de ocurrencia de fugas en el sistema de abastecimiento.
8. **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. Asimismo, el manejo de estadísticas de fugas permite establecer mejores estrategias en las acciones subsecuentes de reparación y control.

Para evaluar la situación de cada uno de estos subproyectos básicos, se comienza por elaborar una serie de encuestas con 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 44 se muestra un ejemplo del contenido de estas fichas.

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 el surgimiento de 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. Esta 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, y f) El personal del área realiza una evaluación estadística mensual de los trabajos de reparación de fugas efectuadas en el período, en un sistema de cómputo, mediante el cual se pueden realizar consultas por tipo de falla, tipo de tubería, diámetro, etc.,; adicionalmente se elaboran gráficas de tendencia.

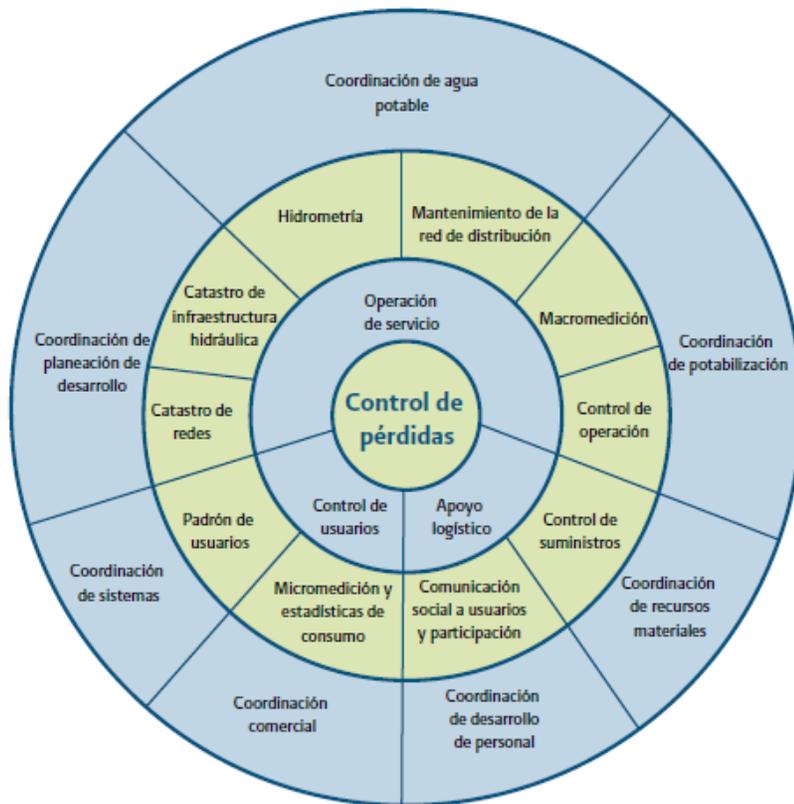
Recursos humanos y materiales: Para ejecutar estos trabajos, el departamento de mantenimiento y operación cuenta con un ingeniero civil encargado del área, un auxiliar (sobrestante), y 12 cuadrillas (de las 16 existentes en el área). Se cuenta con equipo de radiocomunicación móvil en vehículos y manuales 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 sí tiene un programa intensivo de atención al público sobre fallas en el sistema; sin embargo, el área no cuenta con ningún programa de detección de fugas continuo, no cuenta con personal capacitado en esta actividad y no se dispone de equipos localizadores para llevar a cabo la búsqueda de fugas ocultas. Asimismo, no obstante que se tiene 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.

TABLA 44 FICHA DE MANTENIMIENTO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN (LOCALIZACIÓN, REPARACIÓN Y ESTADÍSTICAS DE FUGAS)

Con toda la información recabada en los departamentos del organismo operador, se construye 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 figura 40.

ILUSTRACIÓN 40 EJEMPLO DE UN ESQUEMA GRÁFICO DE INTERRELACIÓN DE LOS DEPARTAMENTOS DE UN ORGANISMO OPERADOR CON EL PROCESO DE CONTROL DE FUGAS.



8.2.2.3 Formulación de árboles de problemas de fugas

Después de haber elaborado las fichas técnicas y haber establecido las causas físicas del nivel de fugas actual, se realizan reuniones interdisciplinarias 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 de ellos dentro del proceso de administración y operación del sistema 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. Listar 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 a efecto en forma de árbol sinóptico.
6. Revisar el esquema completo y verificar su validez.

En las figuras 41 y 42, se muestran algunos componentes de un árbol de problemas típico.

ILUSTRACIÓN
41
EJEMPLO
TÍPICO DE
UN ÁRBOL
DE
PROBLEMAS
DE FUGAS

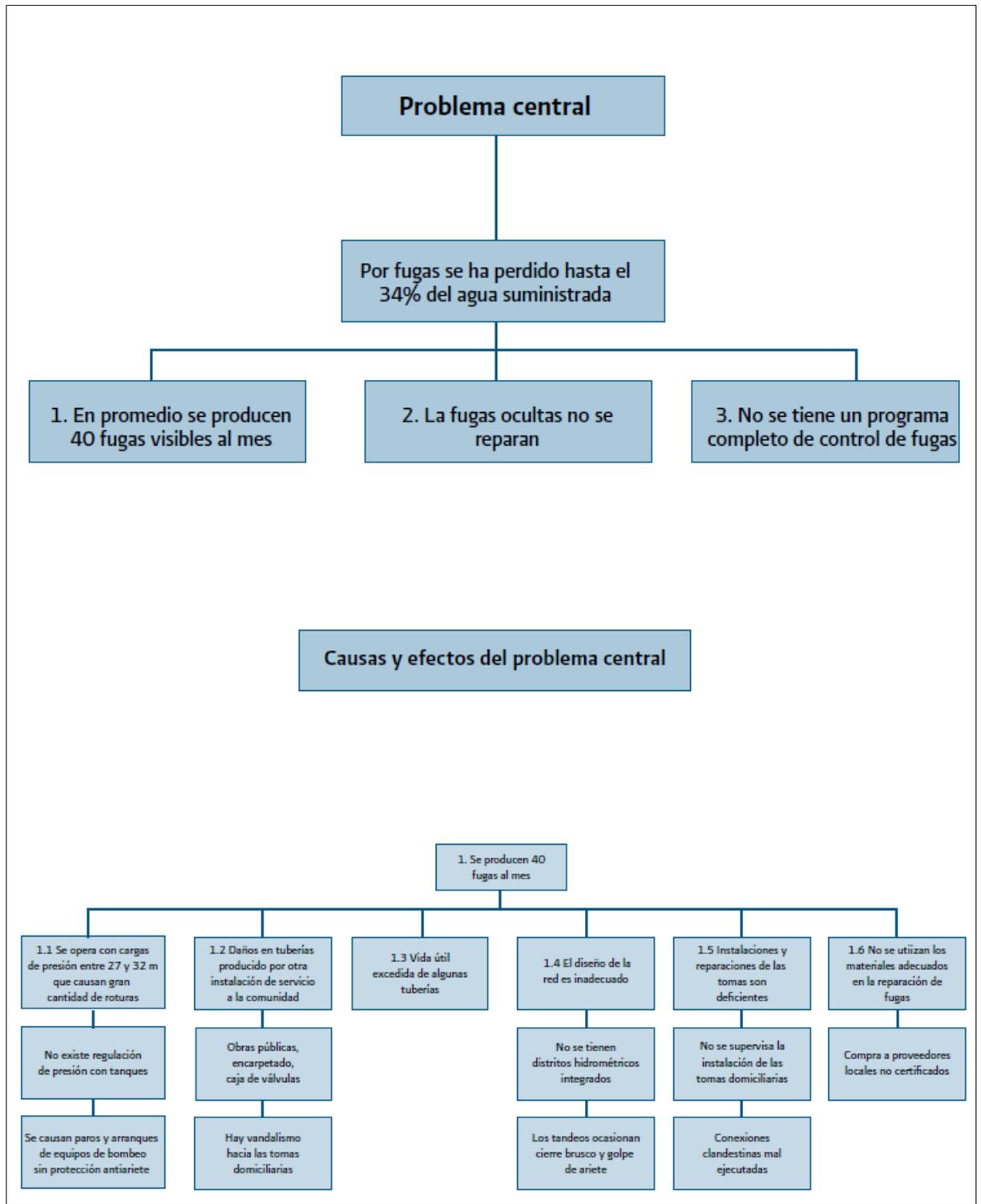
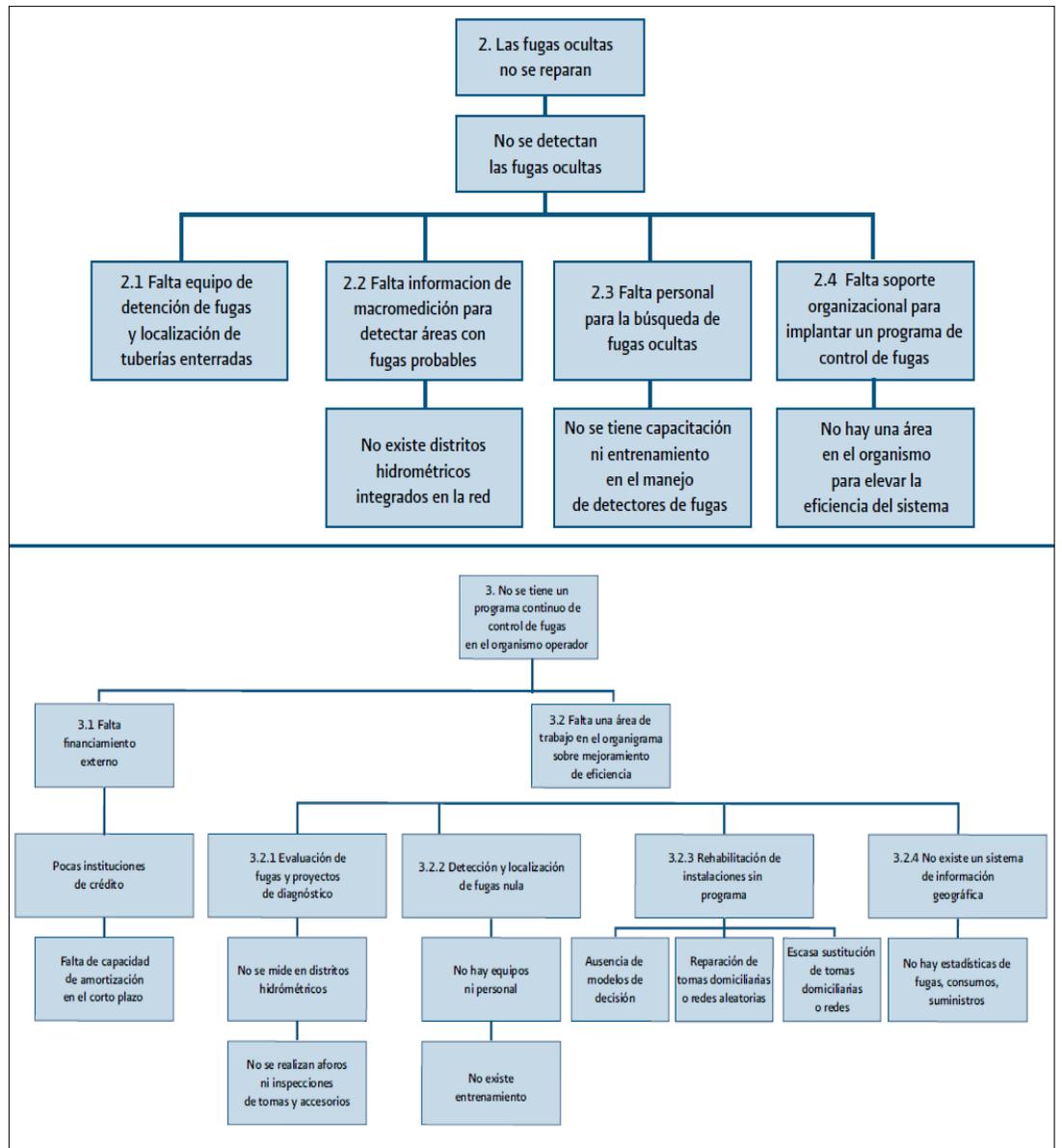


ILUSTRACIÓN 42
EJEMPLO TÍPICO DE
UN ÁRBOL DE
PROBLEMAS DE
FUGAS
(CONTINUACIÓN)



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.

8.2.3 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 la reparación oportuna de cualquier fuga que se produzca en las instalaciones del sistema de abastecimiento.

Las principales funciones técnicas de este grupo de control de fugas son²⁰:

- a) Establecer normas y procedimientos del sistema de mantenimiento de redes.
- b) Definir, analizar y consolidar el sistema de información y estadísticas.
- c) Conducir la adquisición de nuevas tecnologías para la localización y reparación de fugas.
- d) Coordinar la elaboración de manuales de procedimientos para el control de fugas.
- e) Adecuar el área de mantenimiento de redes a los nuevos procedimientos descritos.
- f) Establecer los programas de capacitación del personal.
- g) Elaborar informes de avance, estadísticas y monitoreo de indicadores del programa de control de fugas.
- h) Establecer medidas correctivas y preventivas de rehabilitación de tuberías y reparación de fugas.
- i) Actualizar periódicamente el diagnóstico de fugas y su esquema de control.

En la tabla 45 se muestra un ejemplo de la estructura de un grupo de trabajo 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:

1. Sistema de información.- Encargado de mantener el SIG (sistema de información geográfica), establecer estadísticas y generar modelos de decisión.
2. Detección y localización de fugas.- Desarrollar balances físicos y económicos, localizar fugas ocultas y visibles, implantar mecanismos, tecnologías para la localización de fugas.
3. 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 macromedición; 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 AutoCad, materiales audiovisuales y sobre todo disponer de un presupuesto fijo anual para

²⁰ Enriquez Z.S., Vázquez L. A. y Ochoa A. L., 1993, *Control de fugas en sistemas de distribución, Libro II, tema 2.4, Manual de diseño de agua potable y alcantarillado*, MAPA, CONAGUA, México

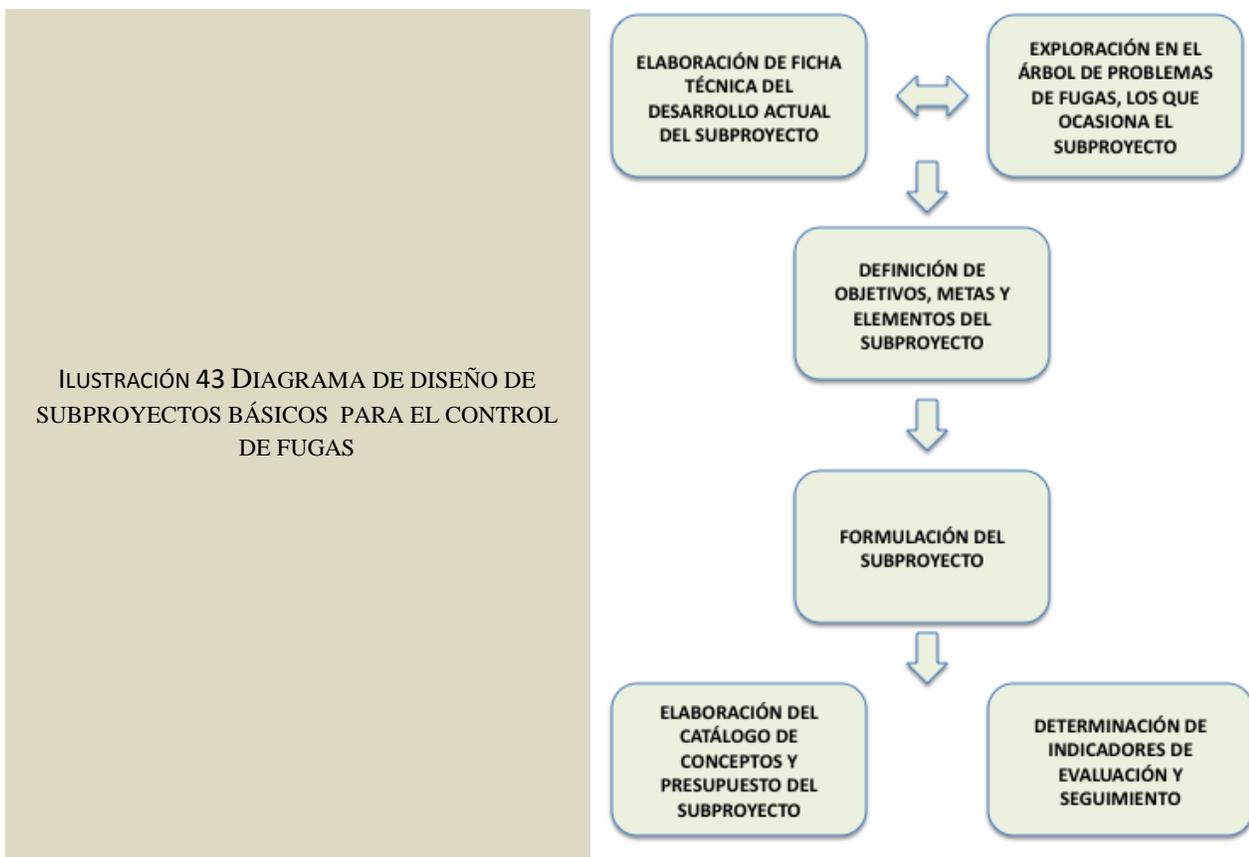
efectuar sus programas de trabajo.

Presupuesto anual: Se calcula una inversión inicial de 1'550,000 pesos y para sueldos, materiales e insumos un monto de 665,000 pesos por año.

TABLA 45 EJEMPLO DE LA ESTRUCTURA DE UN ÁREA DE NUEVA CREACIÓN PARA EL CONTROL DE FUGAS

Una vez diseñada la estructura del grupo de trabajo, se determinarán las medidas preventivas y facilitadores de la reducción y control de fugas, que estarán integradas por los subproyectos básicos mencionados en el capítulo 8.2.2.2 del manual. En esta etapa de la elaboración 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 figura 43 se muestra un diagrama que indica el procedimiento que se sigue para diseñar un subproyecto básico.



En el manual de *Planeación de acciones de incremento y control de la eficiencia física en sistemas de agua potable* publicado por la CONAGUA²¹, se encuentra un catálogo detallado de los subproyectos que pueden ser útiles para orientar su diseño.

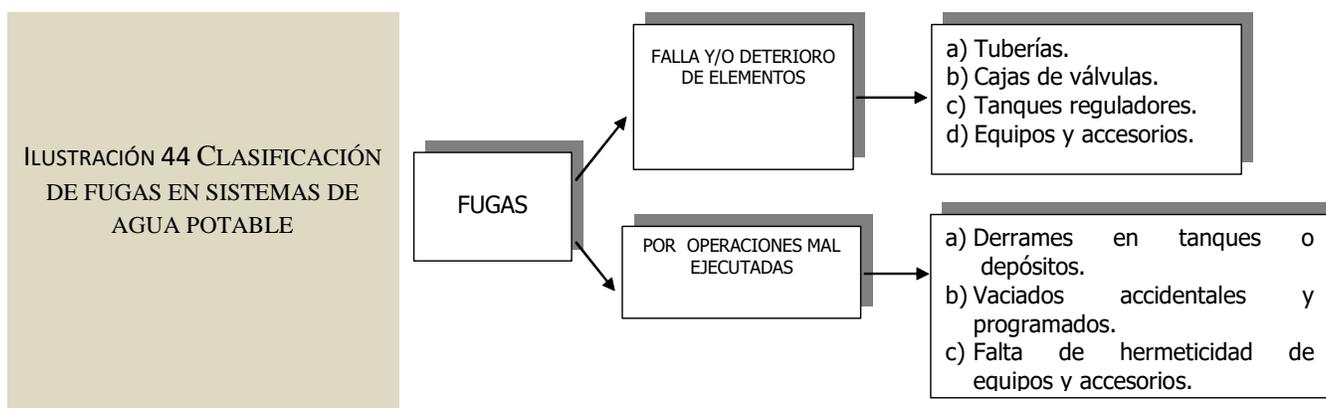
8.2.4 Definición de acciones para la eliminación intensiva de fugas para alcanzar un nivel aceptable

Las acciones para eliminar en forma intensiva las fugas se aplican cuando el nivel rebasa el 20% del volumen suministrado al sistema. Este valor se obtiene del balance de fugas descrito en el capítulo 7.1 de este manual. 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. Por lo tanto, resulta importante en este capítulo del manual, analizar el origen de las fugas y las técnicas de localización y reparación existentes.

8.2.4.1 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 tuberías y tanques. Los derrames en los depósitos, los vaciados de tuberías, los desfuegos, el purgado de máquinas, etc.; en fin, toda el agua que se escapa y que nadie utiliza, es considerada una fuga.

Las causas de fugas se aprecian en la figura 44.

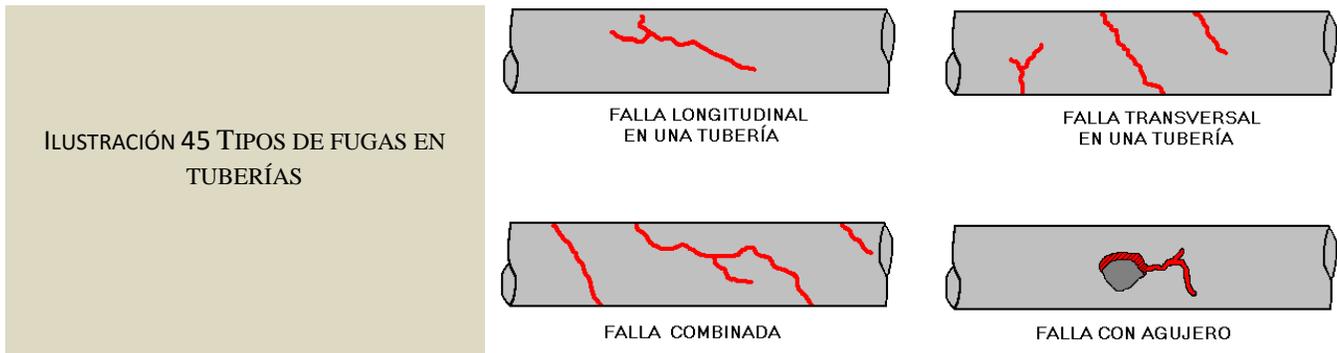


Las fugas pueden ser visibles u ocultas. Las visibles brotan a la superficie y humedecen el terreno. La mayoría de estas fugas las reportan los usuarios, fontaneros o personal del organismo operador y normalmente duran poco tiempo (de dos horas a siete días), dependiendo de la capacidad del organismo 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 hasta años. En general, es correcto suponer que este tipo de fugas tienen periodos de existencia iguales a 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.

²¹ Ochoa A. L., 2005, *Planeación de acciones de incremento y control de la eficiencia física en sistemas de agua potable*, CONAGUA, México

Las fugas se presentan en distintas formas. Algunas de ellas ocurren en los accesorios de las tuberías y en el cuerpo de la tubería, pudiendo ser éstas rajaduras y agujeros. Las rajaduras se dividen en longitudinales y transversales, dependiendo de la causa de la falla, como se observa en la figura 45.



Las fugas más comunes en tomas domiciliarias ocurren por fallas en la inserción con la tubería de distribución, en sus codos y uniones, y en el 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 (*estopero*) y en las juntas. Particularmente, 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 merece 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 mano de obra con que se instalan o reparan los tubos.
- Tuberías con muchos años de antigüedad.
- Movimientos del suelo (sismos).

En la actualidad, la localización de 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 rango de frecuencia de entre 350 y 2000 Hz (ciclos por segundo). Los sonidos ambientales se encuentran en el intervalo de hasta 350 Hz.

En tuberías metálicas el sonido se transmite mejor que en las no metálicas. Las presiones altas facilitan la localización, puesto 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:

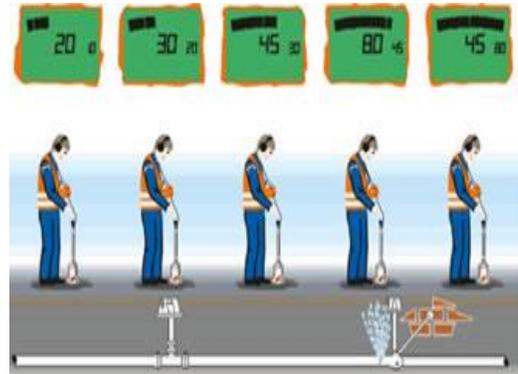
- 1) **Equipos de detección directa.** Son aquellos que requieren de un punto de contacto con las tuberías, tomas domiciliarias o válvulas de la red. Comúnmente detectan el sonido de la fuga que viaja a través de estos elementos. Dentro de esta clasificación se encuentran los geófonos de punta y correladores. En la figura 46 se muestran fotografías de estos detectores de fugas.

ILUSTRACIÓN
46
CORRELADOR
LOCALIZADOR
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 fundamentalmente. En la figura 47 se muestra una fotografía de este tipo de detector de fugas.

ILUSTRACIÓN 47
GEÓFONO
LOCALIZADOR 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 dificultando 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 sustitución del tramo dañado. La decisión de remplazar (rehabilitación), o reparar las tuberías o componentes del sistema, se basa en considerar factores como: presiones en la red, tipo de terreno, vida útil de la tubería, tipo y calidad del material, diseño inadecuado, el factor de rugosidad de la tubería, operación de la red y los programas de mantenimiento. Los registros históricos de fugas también se emplean en esta decisión.

Un remplazo es justificado cuando se tienen niveles elevados de:

1. Frecuencia de daños.
2. Corrosión externa en las tuberías, tomas y piezas especiales.
3. Costos elevados de reparación de los daños.
4. Daños severos en la red principal.

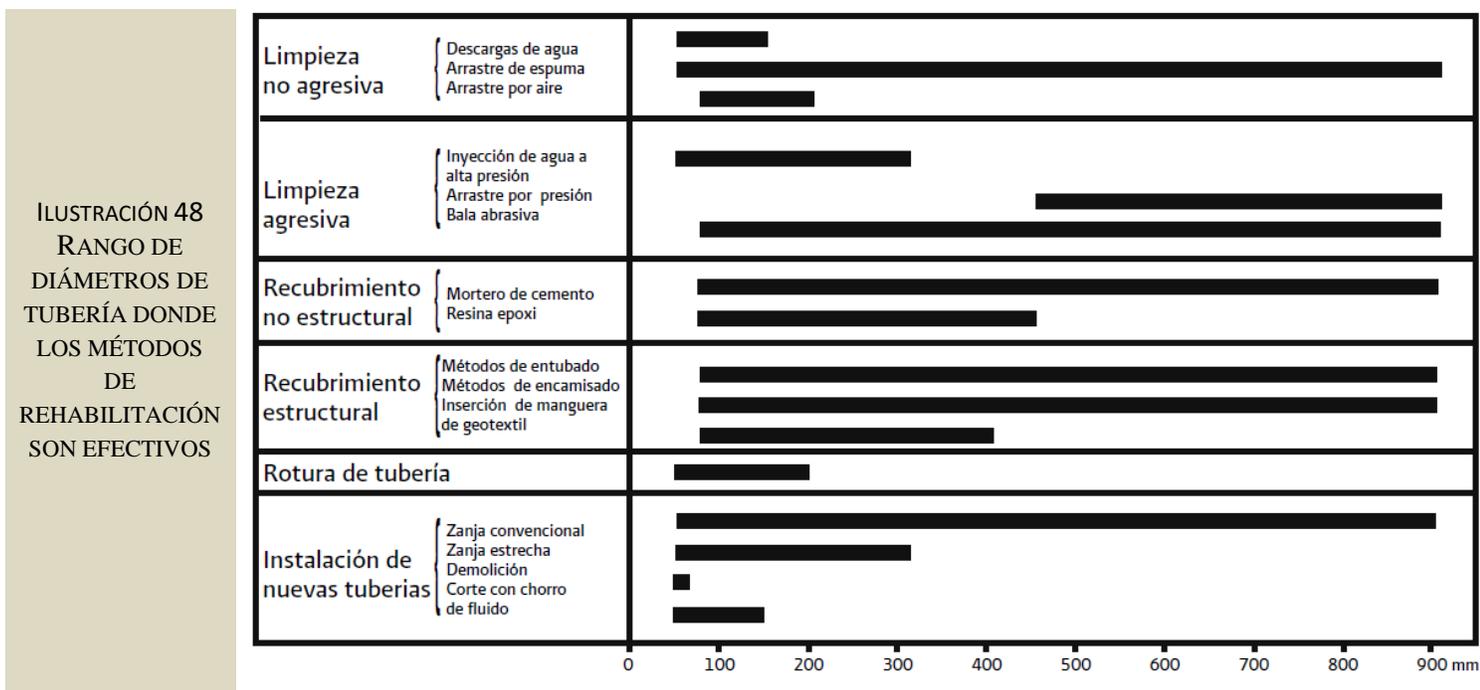
Una reparación es justificada cuando existe:

1. Baja de presión no significativa en la línea.
2. Daños locales pequeños en la red principal y en tomas domiciliarias.
3. Baja frecuencia de daños.

Existen varios métodos y tecnologías comerciales para rehabilitar y renovar tuberías²², entre los cuales se encuentran los siguientes:

- a) **Limpieza no agresiva.**- Descargas de agua, arrastre con espuma y aire.
- b) **Limpieza agresiva.**- Corros de agua a altas presiones, rascado a presión, bala abrasiva.
- c) **Revestimiento no estructural.**- Revestimiento de mortero de cemento y resina *epoxi*.
- d) **Revestimiento estructural.**- Entubado, encamisado y manguera de geotextil.
- e) **Restitución de tubería.**- Empuje de tubería vieja por tubería nueva con rotura.
- f) **Instalación de tuberías nuevas.**- Restitución de tubería vieja por zanjeado.

En la figura 3.12 se presenta un resumen de los rangos de diámetros en donde los métodos son más efectivos.



22 Cabrera R. E. y Cabrera M. E., 2004, Técnicas modernas de rehabilitación y renovación de tuberías, Evaluación y control de pérdidas en redes urbanas, Editado por el Instituto Tecnológico del Agua, UPV, España

8.2.4.2 *Procedimiento para localización y reparación de fugas en tomas domiciliarias*

La detección y localización de fugas en tomas domiciliarias se hace con base 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 se recomienda mejor el empleo de 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, contemplando 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. Se calculan los indicadores siguientes y se evalúan periódicamente:

- a) Porcentaje de tomas inspeccionadas = número de tomas inspeccionadas/número de tomas por inspeccionar.
- b) Porcentaje de ocurrencia de fugas en tomas = número de tomas con fuga encontradas/número de tomas inspeccionadas.
- c) Porcentaje de ocurrencia de fugas por tipo de material, lugar de la fuga, tipo de falla.
- d) Gasto unitario de fuga en toma domiciliaria.

8.2.4.3 *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 visual 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. Se debe 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 posteriormente 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 utilizando los equipos localizadores de objetos metálicos para encontrar las cajas de válvulas enterradas; 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:

- Porcentaje de cajas inspeccionadas = número de cajas inspeccionadas/número de cajas por inspeccionar.
- Porcentaje de ocurrencia de fugas en cajas de válvulas = número de cajas con fuga/número de cajas inspeccionadas.
- Porcentaje de ocurrencia de fugas por tipo de válvula, lugar de la fuga, tipo de falla.
- Gasto unitario de fuga en caja de válvula.

8.2.4.4 *Localización y reparación de fugas en tuberías principales y secundarias, y en tanques*

La detección y localización de fugas en tuberías principales y secundarias 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. También, se deben elaborar las estadísticas respectivas.

La localización y reparación de fugas en tuberías principales y secundarias 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 las 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 = longitud de tubería inspeccionadas/longitud total de tubería por inspeccionar.
2. Porcentaje de ocurrencia de fugas en tuberías = número de fugas encontradas/número total de fugas en el sistema.
3. Porcentaje de ocurrencia de fugas por tipo de material, lugar de la fuga, tipo de falla.
4. Gasto unitario de fuga en tubería principal o secundaria.

8.2.5 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, etc.

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 puede ser la implantación de un departamento de control de fugas, módulos de atención al público para reporte de fugas, equipos urgentes, capacitación al personal, etc.
- 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 = volumen de pérdidas / volumen producido.
 - b) Relación beneficio-costo de la reducción y control = costo de acciones / costo del agua recuperada.

En la tabla 46 se presentan las actividades específicas que se deben desarrollar en un programa de control de fugas de sistemas de agua potable.

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.	3.70
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 tuberías principales y secundarias 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 tuberías principales.	1.59
14	Implantación de un sistema de monitoreo en tiempo real y de información geográfica para búsqueda y detección de fugas ocultas.	2.89

TABLA 46 SECUENCIA DE ACTIVIDADES PARA IMPLEMENTAR UN PROGRAMA DE CONTROL DE FUGAS

8.2.6 Estimación de costos, calendarización y esquema de financiamiento

El proyecto de eficiencia volumétrica queda terminado con el cálculo de cantidades y costos de las actividades individuales, con su calendarización y su presupuesto. Asimismo, deben recomendarse los posibles esquemas de financiamiento y dejarlos escritos en el informe final del programa. Un punto importante es la priorización

de las acciones y subproyectos básicos, lo cual puede realizarse de dos maneras: con base en la relación beneficio-costos o atendiendo a su secuencia técnica lógica de ejecución.

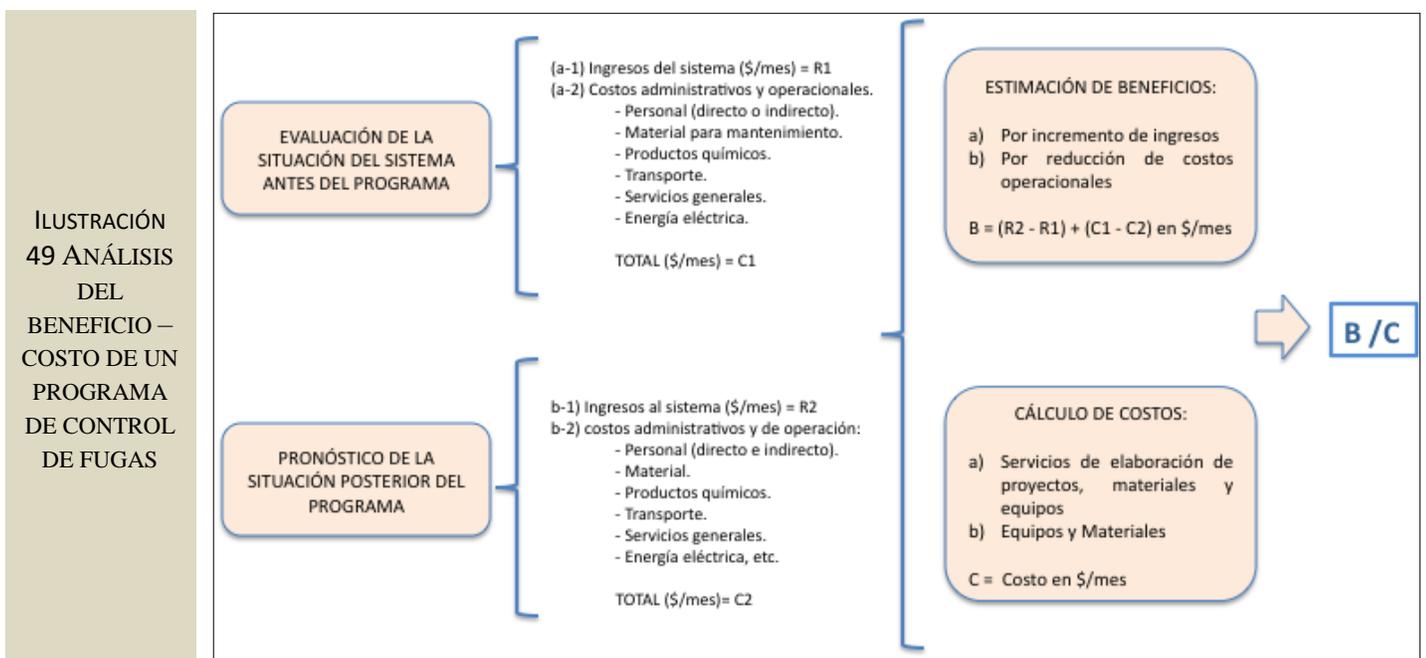
La evaluación de la relación beneficio-costos (B/C) tiene el propósito de demostrar el resultado económico financiero de las acciones y subproyectos básicos. Conceptualmente, se pueden distinguir los tres casos siguientes:

B/C > 1 Demuestra el incremento del rendimiento promovido por los proyectos y acciones

B/C = 1 Muestra que los proyectos no surtirán efecto económico

B/C < 1 Muestra que los proyectos tendrán efectos negativos en la economía del sistema de agua

La manera de realizar el citado análisis beneficio-costos global se propone en la figura 49.



La priorización de las acciones y subproyectos básicos atendiendo a la secuencia lógica de ejecución, se complementa con el análisis de beneficio – costo. Para ello hay que tener en cuenta que las acciones de eliminación de fugas dependen de algunos subproyectos básicos y a su vez, dichos subproyectos dependen de su grado de desarrollo. También es necesario recordar que de igual manera, el control de fugas depende de que se ejecuten acciones de eliminación.

Siempre se buscará que la implementación de un control de fugas, con sus acciones de eliminación intensiva, medidas facilitadoras y subproyectos básicos, sean acciones autofinanciables y promuevan la sustentabilidad del organismo operador. Por lo tanto, se debe efectuar un análisis financiero profundo y buscar de qué forma las inversiones pueden ser amortizadas con los ahorros directos de agua, o los ahorros indirectos por el ahorro de energía eléctrica o procesos de potabilización. No obstante, en muchas ocasiones el organismo no tiene el capital suficiente para ejecutar inversiones, por lo que puede recurrir a instancias estatales, federales e

internacionales para obtener créditos, siempre y cuando demuestre en sus análisis financieros la rentabilidad de los proyectos.

Capítulo 7

Eficiencia Hidráulica

9 Eficiencia hidráulica

9.1 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 se puede evaluar a través de dos métodos:

- 1) Por medio de indicadores generales
- 2) Por medio de una metodología para determinar el Balance Volumétrico

Los indicadores generales son parámetros que permiten hacer una evaluación rápida de la eficiencia con la que el organismo operador entrega el servicio de agua. La segunda forma de evaluación es complementaria a la primera por medio de una metodología más detallada que permite realizar un diagnóstico más preciso de la eficiencia con la que funciona el sistema de agua potable, desde la fuente hasta la entrega final al usuario, dando como resultado final de dicha eficiencia el balance volumétrico, que es la relación espacial de la entrega de agua con la población a la que se sirve.

De esta manera a continuación se explica de forma detallada estas dos formas de evaluación de la eficiencia hidráulica.

9.1.1 Evaluación de Eficiencia Hidráulica por medio de indicadores generales

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/día)
- Dotación (l/hab/día)
- Continuidad del servicio de agua (horas/día)
- Déficit entre el caudal de agua disponible en la red y el caudal de agua requerido por los usuarios (\pm %)
- 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.

9.1.1.1 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 47.

$$Cu_d = \frac{C_d}{n_p}$$

ECUACIÓN 47

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.

La Comisión Nacional del Agua, CONAGUA²³, determinó los consumos unitarios domésticos, clasificados por tipo de usuario (residencial, medio y popular) y en función de la temperatura media anual de la población (clima). Estos valores se reproducen en las tablas 47 y 48, 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.

CLIMA	CONSUMO UNITARIO POR CLASE SOCIOECONÓMICA (l / hab. / día)		
	RESIDENCIAL	MEDIA	POPULAR
Cálido	400	230	185
Semicálido	300	205	130
Templado	250	195	100

Nota: Para los climas fríos se consideran los mismos valores que para clima templado

TABLA 47 CONSUMO UNITARIO DOMÉSTICO, CONAGUA

TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)	TIPO DE CLIMA
Mayor que 22	Cálido
De 18 a 21.9	Semicálido
Menor que 18	Templado o frío

TABLA 48 CLASIFICACIÓN DE CLIMA DE LOCALIDADES MEXICANAS, CONAGUA

El cálculo del consumo unitario doméstico, según los datos de CONAGUA, 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 usos no-domésticos, le corresponde a cada habitante de la población.

²³ CONAGUA, 1993, *Manual de Diseño de Agua Potable y Alcantarillado, MAPAS, Libro V.1 de Datos Básicos, México*

9.1.1.2 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 (capítulo 7.1 del manual), 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 48.

$$Dot = \frac{Vol_{sc}}{n_p * 365} * 1000$$

ECUACIÓN 48

Donde:

Vol_{sc} = Volumen suministrado al sistema en un año corregido (m^3).

Dot = Dotación (l/hab/día).

n_p = Número de habitantes servidos de la localidad.

9.1.1.3 Continuidad del servicio de 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 49.

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

ECUACIÓN 49

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.

9.1.1.4 Déficit entre el caudal de agua disponible en la red y el caudal de agua requerido por los usuarios

Por diversas razones, tales 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., la disponibilidad del agua potable ofertada por el sistema hidráulico es diferente al agua requerida por los usuarios. Este problema trae como consecuencia una ineficiencia hidráulica en la distribución en la red, 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 50.

$$Def_{sar} = \sum_{i=1}^{n_{zs}} p_{z,i} \left(\frac{Q_{s,i} - Q_{req,i}}{Q_{ts}} \right)$$

ECUACIÓN 50

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.

9.1.1.5 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 el capítulo 7.2.1 de este manual. Los datos de campo se promedian aplicando la ecuación 51.

$$p_{med} = \frac{\sum_{j=1}^{m_p} p_j}{m}$$

ECUACIÓN 51

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.

9.1.2 Elaboración del diagnóstico de eficiencia hidráulica

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

1. El análisis del estado físico y la capacidad de producción de las fuentes de abastecimiento
2. La identificación de las características de la población.
3. La descripción del funcionamiento actual del sistema de agua potable.
4. La actualización de los planos de la red.
5. El cálculo de consumos, dotación y gastos de operación.
6. 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.

9.1.2.1 Estado físico y la capacidad de producción de las fuentes de abastecimiento

Las fuentes de abastecimiento son los elementos primordiales de los sistemas de abastecimiento, ya que representan el origen de todo el sistema, si no se analiza su capacidad de producción y el estado que guardan las mismas no se podrá garantizar la eficiencia en la entrega del agua a los usuarios. Es por esto que como primer paso para el diagnóstico de la eficiencia hidráulica se incluye un diagnóstico de las fuentes de abastecimiento.

El análisis para el diagnóstico de las fuentes de abastecimiento se debe realizar en dos sentidos.

1. Diagnóstico del estado físico de los elementos que conforman la fuente de abastecimiento.
2. Diagnóstico de la capacidad de producción de la fuente de abastecimiento.

El primero tiene la finalidad de garantizar que los elementos que conforman la fuente de abastecimiento se encuentran en buen estado y garantizan la vida útil de la fuente, revisando primero los elementos que permiten el aislamiento de dicha fuente ante cualquier contaminante y que se encuentran definidos en la *Norma Oficial Mexicana NOM-003-CNA-1996*, y en segundo los elementos que pueden sufrir deterioro y provocar la inutilización de dicha fuente.

El segundo tiene la finalidad de obtener en forma rápida, el gato máximo de extracción que se pueden obtener de la fuente, o determinar si el gasto máximo de extracción que se está realizando actualmente de dicha fuente es adecuado o no, para la conservación de dicha fuente.

9.1.2.1.1 Diagnóstico del estado físico de los elementos que conforman la fuente de abastecimiento

La mayoría de las fuentes de abastecimiento para un organismo operador lo conforman la explotación de pozos profundos, en menor medida las captaciones superficiales en obras de toma tanto en presas o cuerpos de agua, como en ríos.

Para Pozos Profundos

En el caso de diagnóstico del estado físico de los elementos del pozo profundo, se deberá tomar como base el listado llenado durante la visita de inspección y las fotografías tomadas en la misma, de acuerdo a lo mencionado en el capítulo 7.2.4.2. y la tabla 36.

De acuerdo a esto, se debe realizar el diagnóstico de acuerdo al resultado de la visita de inspección y comparando con la *NOM-003-CNA-1996*²⁴ de los siguientes puntos.

- a) El área que rodea el emplazamiento del pozo está libre de instalaciones contaminantes en un radio mínimo de 30 m.
- b) Ademe para protección del pozo en buenas condiciones.
- c) Existe una sobre elevación del ademe por encima del nivel del suelo. (Anotar medición de la sobre elevación). De acuerdo a la NOM, esta sobre elevación debe ser de al menos 0.30 m sobre el nivel del terreno.
- d) El ademe ranurado se encuentran en buenas condiciones. La inspección de este elemento se puede observar si se realiza un video del pozo, lo cual sería conveniente, para determinar si no hay incrustaciones o deterioro, ruptura o colapso de este elemento.
- e) Existe Filtro granular y engravadores. Se debe observar si este filtro se encuentra apelmazado o tiene que ser repuesto.
- f) Existe Contraedme.
- g) Existe plantilla de concreto al rededor del pozo. Tipo y dimensiones de la plantilla. De acuerdo a la norma esta plantilla debe ser de forma cuadrada, de 3 veces el diámetro del contra ademe por lado y concéntrica al pozo.
- h) Existe brocal en el pozo, anotar tipo de brocal y dimensiones. El brocal de acuerdo a la norma debe tener al menos 0.5m de altura.
- i) Tomar muestra en recipiente transparente del tren de descarga por toma lateral. Esta muestra presenta sólidos o arenas.

El objetivo de inspeccionar estos elementos es el de obtener un diagnóstico de la vulnerabilidad del pozo ante riesgos de contaminación o ante riesgo de la intrusión de arenas o sólidos al sistema de abastecimiento.

Por un lado, si el acuífero se contamina por no contar con los elementos de protección adecuados, la fuente quedará inútil para su uso, y por lo tanto podría presentar un déficit en la demanda requerida por los usuarios. Por otro lado, al no contar con un ademe y engravadores en buenas condiciones se podría tener, en el menor de los casos, intrusión de sólidos a los equipos de bombeo que pueden dañar los impulsores y el equipo, provocando costos adicionales de mantenimiento correctivo, así como de mala calidad de agua entregada a los usuarios, y en el peor de los casos el colapso del pozo.

Adicionalmente a estos puntos, es conveniente revisar también el estado de los elementos del tren de descarga, los cuales no deben presentar fugas (juntas, empaques de válvulas, fugas en tuberías) ni puntos donde se aprecie evidencia de corrosión u oxidación.

En el caso de no cumplimiento con los puntos señalados, como parte del diagnóstico del estado de los pozos profundos, se debe anotar las anomalías encontradas en estos elementos así como las acciones correctivas recomendables, para evitar el deterioro de la fuente o la posibilidad de contaminación del acuífero, dejándola a esta fuera de servicio.

Para obras de toma

²⁴ en caso de actualización de esta norma, se deben considerar las modificaciones para la aplicación a la norma vigente

En el caso del diagnóstico del estado físico de los elementos que conforman las captaciones mediante obras de toma en ríos o cuerpos de agua, se debe tener principal atención que durante la visita de inspección se revisen los siguientes puntos:

- a) No deben existir descargas de drenaje sanitario o fuentes de contaminación cercanas a la obra de toma.
- b) Las rejillas y compuertas deben estar limpios y libres de posibles sólidos.
- c) Los desarenadores deben contar con elementos que permitan su limpieza y no deben estar llenos.
- d) Las rejillas de las tomas de los equipos de bombeo deben estar libres de basura o ramas.
- e) Todas las tuberías y trenes de descarga deben estar en buen estado, pintados y libres de óxido o corrosión.
- f) Las estructuras de concreto o mampostería deben también estar en buen estado, sin varillas descubiertas u oxidadas a la vista ni presentar fracturas importantes.
- g) Todas las estructuras metálicas deben estar libres de corrosión u óxido.

En el caso en que alguno de estos puntos de revisión no se cumpla, se debe anotar claramente como diagnóstico del estado físico de las fuentes de abastecimiento las anomalías encontradas y las medidas propuestas para su corrección inmediata.

9.1.3 Diagnóstico de la capacidad de producción de la fuente de abastecimiento

El fin principal de este diagnóstico es determinar si la fuente de abastecimiento tiene la capacidad de extracción del gasto con el que actualmente se encuentra operando, la posibilidad de tener un gasto mayor de extracción o si se está sobreexplotando el acuífero. El resultado de este diagnóstico se debe tomar en cuenta para el Proyecto de Eficiencia Hidráulica que se verá en el capítulo 10 del presente manual.

Para fuentes de captación en obras de toma superficiales como ríos o cuerpos de agua, la capacidad de extracción no depende del abatimiento en forma puntual, sino que dependen de las condiciones climatológicas a lo largo del año en forma temporal, por lo tanto la capacidad de extracción la determina el estudio de explotación del acuífero realizado para la obtención del título de concesión y estudios hidrológicos correspondientes. Por lo tanto el gasto máximo de extracción será en todos estos casos, el definido en el título de concesión otorgado por CONAGUA para la explotación de dicha fuente.

Sin embargo, para las fuentes de abastecimiento en pozos profundos, además de tomar en cuenta lo establecido en los títulos de concesión otorgados por CONAGUA, se debe realizar un análisis más detallado para establecer si los gastos de extracción en la operación actual son adecuados, ya que dependen directamente del abatimiento de los acuíferos.

Es por esto que para el diagnóstico de los pozos, se considera la curva de abatimiento y los coeficientes de utilización descritos en el capítulo 7.2.4.1 de este manual.

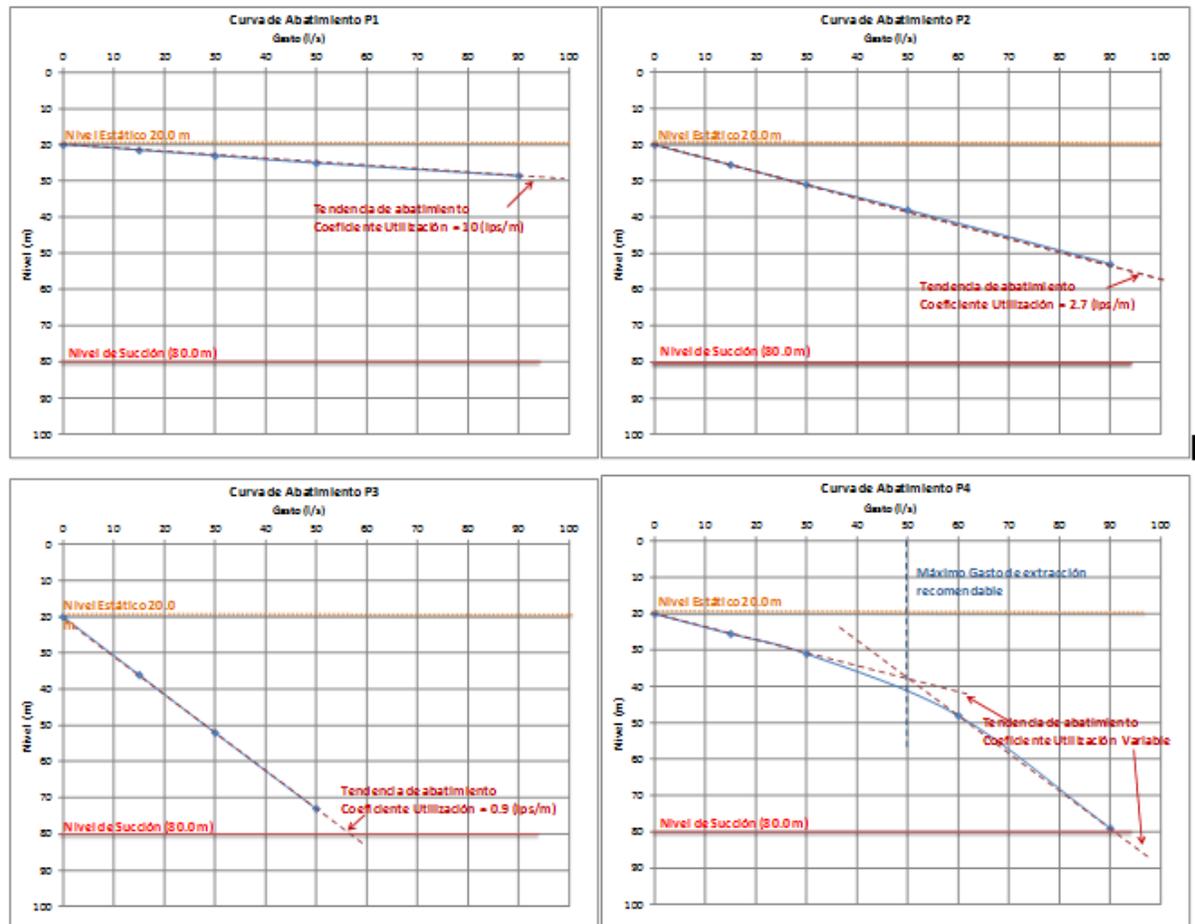
Como resultado de este diagnóstico se podrá obtener la capacidad de extracción o producción del pozo (gastos máximos permisibles) y con ello determinar si es posible garantizar el gasto máximo horario de demanda de la población (si la fuente se conecta directamente al suministro de la red secundaria de abastecimiento), o el gasto medio con el que se puede contar en el caso de que el pozo suministre primero a un tanque de regulación y de ahí a la red secundaria.

Los gastos máximos permisibles de extracción derivados del análisis de las curvas de abatimiento y el coeficiente de utilización de los pozos, deben ser comparados con lo establecido en el título de concesión correspondiente para establecer cuatro posibles alternativas.

- El pozo es muy bueno, y existe la posibilidad de realizar una extracción mayor a la establecida en el título de concesión, por lo que existe la posibilidad de realizar los trámites correspondientes para solicitar una ampliación del gasto de extracción en el título de concesión
- El pozo es rentable y se puede contar con un gasto de extracción un poco mayor que al que actualmente se está explotando, con un máximo igual al establecido en el título de concesión.
- El pozo está justo en su límite de explotación y no se puede contar con mayor gasto de extracción, recomendando seguir explotándolo al mismo gasto o menor al que actuales se está operando.
- El pozo no es rentable, se está sobreexplotando y debe ser cegado, buscando otra fuente de abastecimiento o la sustitución del pozo.

A continuación se describe el análisis que se realiza tomando como base los datos de las curvas de abatimiento y los coeficientes de utilización descritos en el capítulo 7.2.4.1 y de acuerdo a cuatro comportamientos típicos según se muestra en la figura 50 siguiente.

ILUSTRACIÓN 50
COMPORTAMIENTO
TÍPICO DE CURVAS
DE ABATIMIENTO
EN POZOS
PROFUNDOS.



Los cuatro típicos comportamientos de una curva mostrados en la figura 50 tienen la siguiente interpretación para el análisis.

La curva de abatimiento del pozo 1 (P1) muestra una recta con una pendiente muy suave, lo cual representa que el pozo tiene una gran capacidad de recarga y que casi no presenta abatimiento, esto quiere decir que prácticamente no tiene límite máximo de extracción y por lo tanto, el caudal de extracción no presenta un factor de abatimiento. Dentro de este tipo de comportamiento se pueden clasificar aquellos pozos cuyo coeficiente de utilización es mayor a 5 lps/m, es decir que por cada 5 litros por segundo o más que se extraen se espera un abatimiento de tan solo 1 metro.

La conclusión en el diagnóstico de los pozos que presentan el tipo P1 en su curva de abatimiento es que: *“Es muy bueno, y existe la posibilidad de realizar una extracción mayor a la establecida en el título de concesión, por lo que existe la posibilidad de realizar los trámites correspondientes para solicitar una ampliación de extracción en el título de concesión”*.

La curva de abatimiento del pozo 2 (P2) muestra una recta con una pendiente más inclinada que la P1, sin embargo se puede observar que de acuerdo a la tendencia de esta recta, el máximo de extracción tendrá como límite el punto donde el abatimiento sea tal que todavía se garantice un nivel del agua por arriba de la succión de la bomba para evitar la intrusión de aire. Dentro de este tipo de comportamiento se pueden clasificar aquellos pozos cuyo coeficiente de utilización esté entre 1.5 y 5 lps/m, es decir que por cada 1.5 o 5 litros por segundo de extracción, se espere un metro de abatimiento en el pozo.

La conclusión para el tipo de pozos que presentan un comportamiento similar a P2 es que: *“El pozo es rentable y se puede contar con un gasto de extracción un poco mayor que al que actualmente se está explotando, con un máximo igual al establecido en el título de concesión”*

La curva de abatimiento del pozo 3 (P3) muestra una recta con una pendiente muy inclinada, la cual llega rápidamente al nivel de succión de la bomba, esto representa que el pozo no tiene capacidad de extracción, o que su capacidad es muy pequeña, ya que con poca variación de gasto de extracción se presentan grandes abatimientos. Dentro de este tipo de comportamiento se pueden clasificar aquellos pozos cuyo coeficiente de utilización es menor a 1.5, es decir que con menos de 1.5 litros por segundo de extracción se presenta un metro de abatimiento en el pozo.

El tener este tipo de comportamiento (P3) en un pozo en zonas de abastecimiento directo a red donde se tiene una variación del gasto de extracción debido a la demanda de los usuarios, puede presentar problemas serios en la eficiencia de los equipos, ya que la bomba trabaja con una variación de carga, que constantemente sale del punto óptimo de operación de la bomba provocando esta ineficiencia. A este tipo de pozos no es recomendable tenerlos conectados en su descarga directa a una red de distribución.

La conclusión de diagnóstico en pozos con este tipo de comportamiento (P) es que: *“El pozo está justo en su límite de explotación y no se puede contar con mayor gasto de extracción, recomendando seguir explotándolo al mismo gasto o menor al que actuales se está operando”*, o en su defecto si el gasto que se puede extraer es muy pequeño y poco rentable, lo mejor sería dejarlo fuera de servicio o cegararlo.

Por último la curva de abatimiento del pozo 4 (P4) muestra una curva con más de una tendencia en la pendiente de la misma, es decir que el comportamiento primero en el pozo es lineal, hasta un gasto límite donde el abatimiento se comporta de forma exponencial por cada litro por segundo adicional que se extrae. Este comportamiento demuestra que el pozo no tiene la capacidad de producción para el gasto de operación máximo actual que se le está extrayendo y que por lo tanto el acuífero se está sobreexplotando. El límite máximo de extracción en pozos con este tipo de comportamiento será siempre el punto donde cambia la pendiente.

La conclusión del diagnóstico en este tipo de pozos (P4) es que: “El pozo no es rentable, se está sobreexplotando y debe ser cegado, buscando otra fuente de abastecimiento o la sustitución del pozo”, o en su defecto no extraer más del límite máximo permisible que es un punto antes que exista un cambio de pendiente.

Para pozos que presentan una curva de comportamiento de abatimiento similar a P3 y P4 se podría realizar la recomendación de limpieza de engravadores o re encamisado del ademe del pozo, dependiendo de los resultados de la inspección física de las instalaciones. Si no se cuenta con video exploratorio del pozo, se recomienda realizar uno para poder concluir si el pozo puede ser rescatable e incrementar su coeficiente de utilización mediante una rehabilitación sencilla, o si el estado físico del pozo es bueno y realmente el acuífero ha cambiado sus condiciones, y por lo tanto el pozo ya no es rentable, y se debe buscar otra fuente de abastecimiento que lo sustituya.

Es muy importante aclarar que en acuíferos que presentan una variación importante de los niveles estático y dinámico en función del temporal a lo largo del año, se realice este estudio de las curvas de abatimiento y coeficientes de utilización en al menos 2 periodos del año, para determinar si el comportamiento es similar o si se tienen dos o más gastos de explotación o producción de los pozos.

El diagnóstico de las fuentes de abastecimiento dará como resultado medidas de aplicación inmediata para corregir el estado físico de las fuentes, y el gasto máximo de extracción de las fuentes que debe ser tomado en cuenta para el Proyecto de Eficiencia Hidráulica.

9.1.3.1 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, Geografía e Informática* (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 con mucho cuidado; por ejemplo, una vivienda deshabitada o un lote baldío con una toma domiciliaria conectada a la red, es descartada por INEGI en el conteo de habitantes, en cambio el organismo operador puede contabilizarla 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 (capítulo 7.2.1.10 del manual) y extrapolar los resultados para obtener los datos de la población servida.

9.1.3.2 Descripción del sistema y su operación

Una vez recopilada y analizada la información en el organismo operador, se puede proceder 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 desfogue existentes.
3. Ubicación de tanques de regulación y rebombes, capacidad, dimensiones y tipo de material con el que están contruidos.

4. Configuración de la red de distribución con diámetros de tuberías, 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 bombeo y datos de placa de los equipos de bombeo; gráficas porcentuales de ocurrencia de fugas, coberturas de macro y micromedición y 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 se podrán ser tomados en cuenta.

9.1.3.3 *Actualización de los planos de la red*

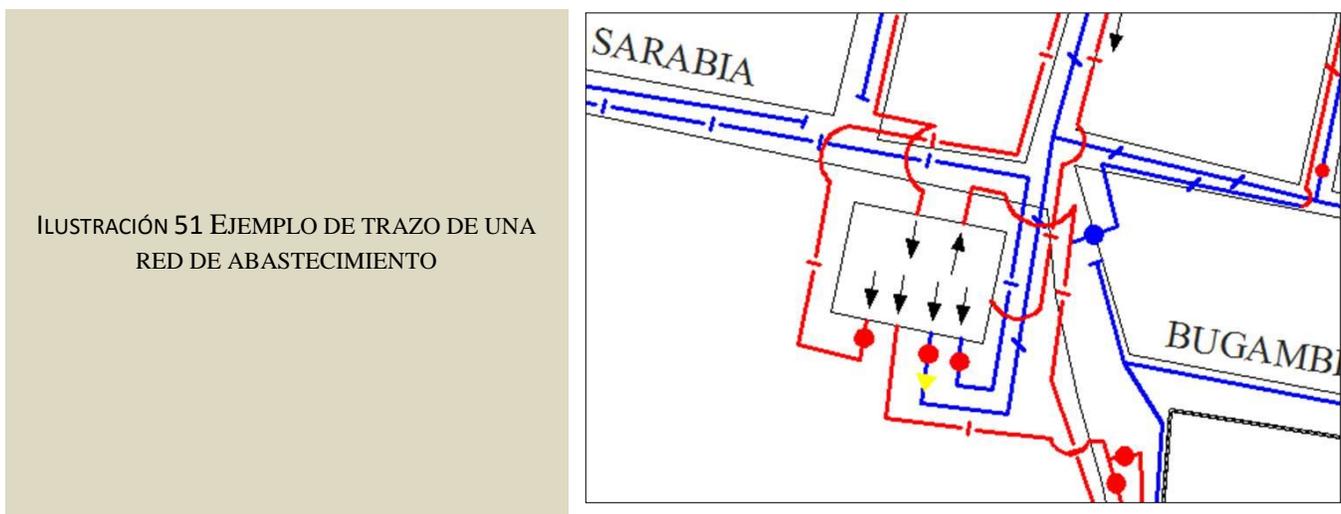
El catastro de la red tiene por objeto dejar evidencia gráfica del estado físico que guarda la red de abastecimiento y de la operación hidráulica, con información actualizada, confiable y organizada de manera adecuada. El catastro de la red se conforma por una serie de planos y fichas técnicas, que sirven para ubicar los elementos de la red, así como para referir el estado y características físicas como son: la topología de la red, el tipo de material, el diámetro de tuberías, simbologías, ubicación de obras de captación, válvulas, tanques, rebombes, potabilizadoras, etc.

Aunque lo deseable es que los planos y fichas técnicas del catastro se encuentren actualizadas y tengan datos confiables, no siempre ocurre esto, por lo que es necesario analizar si la información 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, tal como *AutoCad* o *Microstation*; cuando solo se disponga de una versión impresa de los planos, deberán digitalizarse con este tipo de herramientas.
2. La traza de las calles y colonias de la localidad donde se dibuja la red de tuberías 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.

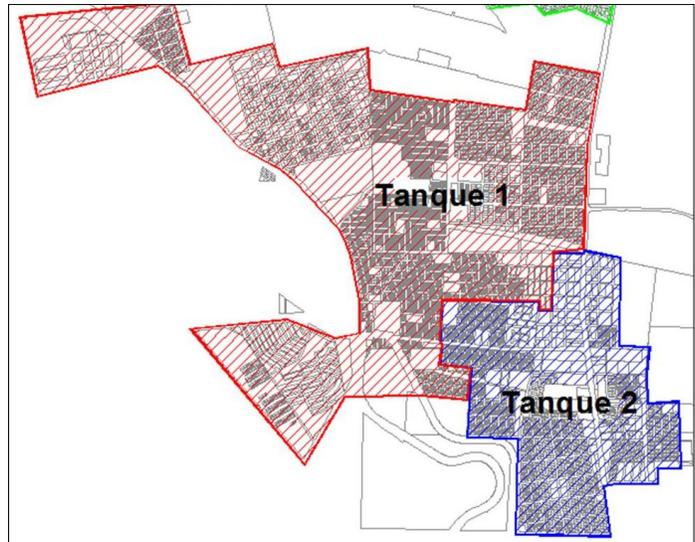
5. En el caso de que existan proyectos de nuevos desarrollos o ampliaciones de la red de agua potable, resulta importante que el organismo operador proporcione los planos correspondientes con la finalidad de incorporarlos al plano de la red.
6. En cuanto a los planos de las líneas de conducción que parten 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 cruceos 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 un *layer* para cada elemento hidráulico que permita su identificación dentro del plano. En la figura 51 se muestra un ejemplo del trazo de la red; los círculos rellenos representan válvulas de seccionamiento abiertas y cerradas, las tuberías de distribución se presentan de color azul y las de conducción de rojo, los arcos en las tuberías indican que no existe interconexión entre ellas y las flechas indican el sentido del flujo en las tuberías de llegada y salida de tanques.



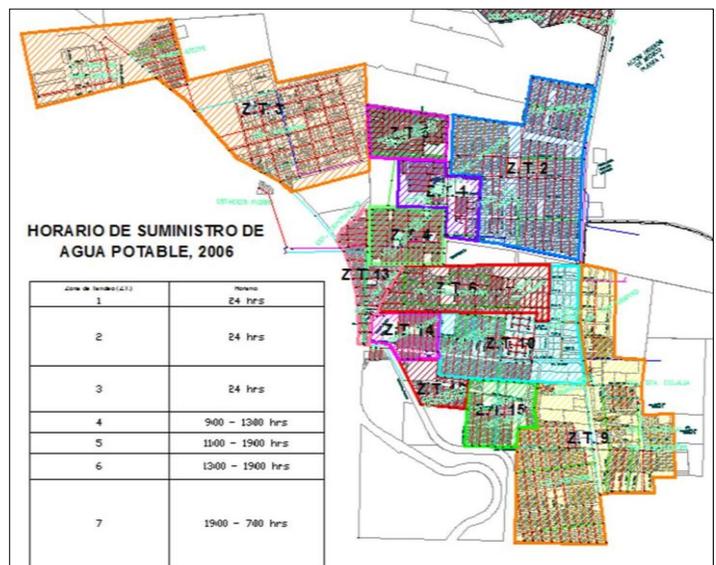
El plano de la red de agua potable debe contener e indicar el alcance de las zonas de influencia de las captaciones de abastecimiento, sea un pozo o tanque o rebombeo, como se muestra en la figura 52.

ILUSTRACIÓN 52 EJEMPLO DE ZONAS DE INFLUENCIA DE FUENTES DE ABASTECIMIENTO



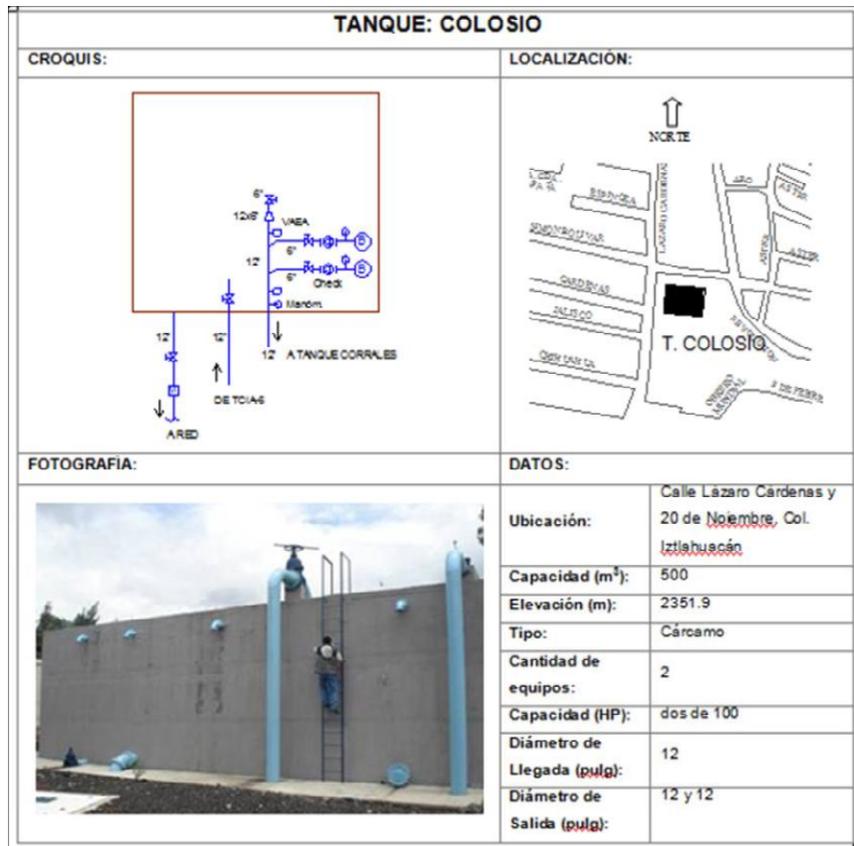
Los organismos operadores que tengan un servicio intermitente o tandeado deben plasmar en el plano su programa de horarios de servicio así como un esquema de las zonas de tandeo, ver figura 53.

ILUSTRACIÓN 53 EJEMPLO DE ZONAS Y HORARIOS DE SERVICIO DE AGUA



La información de la infraestructura hidráulica de la red contenida en los planos como son tanques, rebombes, pozos, plantas potabilizadoras, etc., requieren el detalle del despiece de la fontanería de las interconexiones de las tuberías. En la figura 54 se muestra una ficha técnica del levantamiento de un tanque.

ILUSTRACIÓN 54 EJEMPLO DE UN LEVANTAMIENTO DE FONTANERÍA DE TANQUES



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 elementos son muy importantes en un sistema para el control del flujo. En el capítulo 7.2.1.8 del manual se indica el procedimiento para realizar esta actividad. La información de los cruceros servirá también para verificar y validar el diámetro y tipo de tubería que se encuentra dibujado en el plano de catastro, y con ello realizar las modificaciones pertinentes.

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 con los que disponga el organismo operador con el fin de ubicar las tuberías que no se encuentran digitalizadas y se actualizan las modificaciones que ha tenido la red de agua potable hasta la fecha.
2. Se confrontan los planos existentes con las imágenes satelitales para confirmar su nivel de georeferenciación. 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.
3. 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.
4. Se hace una depuración de las capas o *layers* para optimizar el manejo del plano digital.
5. 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 cruceros.

Los planos actualizados del catastro de la red de agua potable se presentan dibujados a escala 1:2000. Se incluye el croquis de localización que indica la localidad con todas sus vías de comunicación, así como su orientación y coordenadas geográficas obtenidas de las cartas DETENAL que publica el INEGI.

La red se dibuja de acuerdo con la simbología especificada en el *Manual de Diseño de Agua Potable, Libro II, 1ª Sección, tema 1.4 “Redes de distribución”* editado por la CONAGUA. En los cruceros se anota la cota topográfica y en las tuberías 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.

9.1.3.4 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 y 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. En este sentido, interesa 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 9.1.1.1 y 9.1.1.2 del manual, 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 en estudio 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 en el momento de 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 aplicar la ecuación 52.

$$Q_{medreq} = \frac{Dot_{requerida} * n_{serv}}{86400}$$

ECUACIÓN 52

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 (capítulo 3.1 del Manual) y aplicando la 53.

$$Dot_{req} = \frac{Cu_d + Cu_{nd}}{1 - \frac{\% fugas}{100}}$$

ECUACIÓN 53

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 54 (l/hab/día).

$\%fugas$ = Porcentaje de fugas potenciales en el sistema de distribución.

$$Cu_{nd} = \frac{C_{NoDomésticoMedido} + C_{No-doméstico\ cuota\ fija} + C_{No-doméstico\ mal\ medido} + C_{No-doméstico\ adicionales}}{n_{servida}}$$

ECUACIÓN 54

El consumo unitario doméstico requerido para satisfacer adecuadamente a los usuarios, se obtiene de los datos recomendados por la CONAGUA, que están en la tabla 47 de este manual.

9.1.3.5 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.

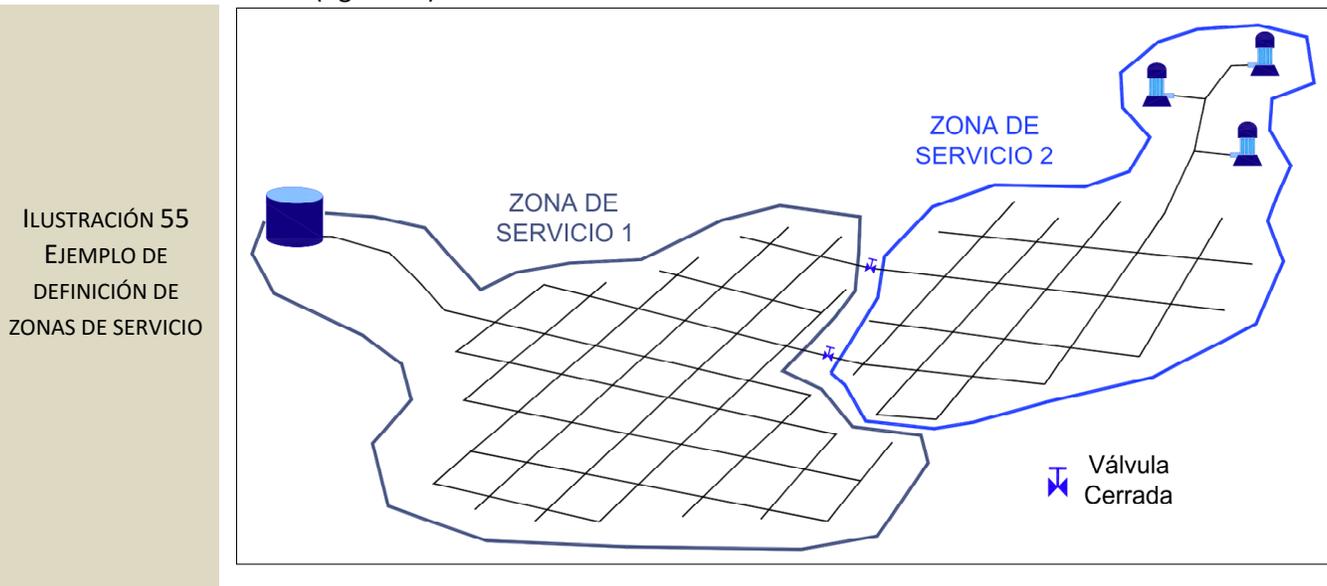
El balance volumétrico se desarrolla en cuatro pasos:

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 a sólo un tanque de regulación, rebombío, 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 (figura 55).



- b) Cuando existen dos o más puntos de conexión entre dos posibles zonas de servicio y los mismos operan generalmente abiertos, se deben de 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 es también complicada 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 al 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.
- 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 las tuberías de ingreso al tanque, se realizarán mediciones durante 24 horas y se calculará un gasto medio de ingreso, de acuerdo con los procedimientos del capítulo 2.2.1.3 del Manual. 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 rebombeo 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 rebombeo 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 rebombeo 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 rebombeo, 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 rebombeo se considere como parte de la zona de servicio anterior al mismo. Cuando este tipo de rebombeo 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 el 65% del gasto máximo 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 una tabla como la 49.

Zona de servicio	Captación	Gasto disponible (l/s)	Gasto disponible total (l/s)	Tipo de distribución
Zona 1	Pozo 1	10.00	10.00	Directa
Zona 2	Pozo 2	15.00	37.00	Directa
	Pozo 3	22.00		
Zona 3	Pozo 4 - Tanque 1	10.00	10.00	Regulada
Zona 4	Pozo 4 - Tanque 2	12.00	25.00	Regulada
	Pozo 5 (20 l/s * 65 %)	13.00		
Sumas		82.00	82.00	

TABLA 49 EJEMPLO DE FORMATO DE DISPONIBILIDAD DE AGUA POR ZONA DE SERVICIO ACTUAL

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 por 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 una tabla como en la tabla 50.

Zona de servicio	Colonia	Usuarios domésticos
Zona 1	Colonia A	350.00
	Colonia B	140.00
Zona 2	Colonia C	210.00
	Colonia D	320.00
	Colonia E	170.00
Zona 3	Colonia F	540.00
Zona 4	Colonia G	335.00
	Gran consumidor 1	1.00
Sumas		2,066.00

TABLA 50 EJEMPLO DE FORMATO DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE USUARIOS

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 tomarán en cuenta la dotación, índice de hacinamiento y coeficientes de variación, calculados como se indica en el capítulo 9.1.3.1, 9.1.3.4 y 7.2.1.3, respectivamente. El balance volumétrico se presentará de manera similar como se muestra en la tabla 4.4, en la cual se resumen los análisis de disponibilidad de agua y distribución espacial de usuarios, se calcula el gasto requerido de acuerdo a su tipo de distribución y se evalúa el desequilibrio de cada zona de servicio. Para el ejemplo presentado la tablas 51 y 52, se utiliza una dotación supuesta de 375 l/hab/día y un índice de hacinamiento de 4.5.

Zona de servicio	Colonia	Usuarios domésticos	Población (habitantes)	Gasto medio (l/s)	Gasto medio (l/s)
Zona 1	Colonia A	350.00	1575.00	6.84	9.57
	Colonia B	140.00	630.00	2.73	
Zona 2	Colonia C	210.00	945.00	4.10	13.67
	Colonia D	320.00	1440.00	6.25	
	Colonia E	170.00	765.00	3.32	
Zona 3	Colonia F	540.00	2430.00	10.55	10.55
Zona 4	Colonia G	335.00	1508.00	6.55	16.55
	Gran consumidor 1	1.00	0.00	10.00	

Sumas		2,066.00	9,293.00	50.33	50.33
--------------	--	-----------------	-----------------	--------------	--------------

TABLA 51 EJEMPLO DE FORMATO DE BALANCE VOLUMÉTRICO

Zona de servicio	Fuentes	Gasto disponible (l/s)	Distribución	Gasto requerido (l/s)	Diferencia (l/s)
Zona 1	Pozo 1	10.00	Directa	20.77	-10.77
Zona 2	Pozo 2	37.00	Directa	29.67	7.33
	Pozo 3				
Zona 3	Pozo 4 - Tanque 1	10.00	Regulada	14.77	-4.77
Zona 4	Pozo 4 - Tanque 2	25.00	Regulada	23.16	1.84
	Pozo 5				
Sumas		82.00		88.36	-6.36

TABLA 52 EJEMPLO DE FORMATO DE BALANCE VOLUMÉTRICO (CONTINUACIÓN)

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 a la fórmula 55 y para zonas reguladas se calcula con la fórmula 56.

$$Q_{req\ directa} = Q_{med} \times CVMD \times CVMH$$

ECUACIÓN 55

$$Q_{req\ regulada} = Q_{med} \times CVMD$$

ECUACIÓN 56

Donde:

Q_{med} = Gasto medido (l/s).

Q_{req} = Gasto requerido (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.

9.2 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 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 es 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 resulte confiables; así 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 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 tuberías; 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 tuberías. 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 9.1.3.1 a 9.1.3.5 del manual), hacer una proyección de la demanda de agua en el tiempo, y considerar las zonas de crecimiento de la mancha urbana. Sin embargo, 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 el capítulo 9.1.2.1 a 9.1.3.5 de este manual. Con ello, se define la capacidad de producción de las fuentes de abastecimiento, 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:

- Conformación de los nuevos sectores para redistribuir los caudales y presiones.
- Elaboración del modelo de simulación hidráulica de la red.
- Análisis y diseño hidráulico de la red sectorizada.
- Análisis y diseño hidráulico de conducciones para entrega de agua en bloque.
- 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, se recomienda aplicar las técnicas y criterios descritos en el documento sobre sectorización publicado por la *Gerencia de Estudios y Proyectos de Agua Potable y Redes de Alcantarillado de la Subdirección General de Agua Potable Saneamiento y Drenaje* de la CONAGUA.

9.2.1 Conformación de sectores para redistribución de caudales y presiones en la red

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.

9.2.1.1 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, y sin olvidar la capacidad de producción y gastos máximos de extracción de las fuentes.

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. Se recomienda 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.

9.2.1.2 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 53.

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

TABLA 53 EJEMPLO DE FORMATO DE REDISTRIBUCIÓN DE CAUDALES

Utilizando el formato de la tabla 53, se propone la primera sectorización aplicando el siguiente procedimiento:

- Columna 1. Se propone un sector identificando la fuente de distribución principal (nombre del tanque o del pozo que inyecta a la red).
- Columna 2. Se identifica la captación o captaciones de abastecimiento (pozos, manantiales, presas, etc.) que inyectan al tanque o directamente a la red.
- Columna 3. Utilizando el mismo criterio que en el balance volumétrico del capítulo 9.1.3.5 del presente manual, se determina el gasto disponible para el sector propuesto.
- Columna 4. Se proponen las colonias o zonas identificadas de población, que serán abastecidas en este sector.
- Columna 5. En esta columna se ingresa el número de usuarios domésticos de cada colonia propuesta para el sector.
- Columna 6. Se calculan los habitantes en cada colonia o zona de población multiplicando sus usuarios por el índice de hacinamiento.
- Columna 7. Se calcula el gasto medio demandado por los habitantes utilizando la dotación de proyecto.
- Columna 8. En esta columna se coloca la suma de los gastos medios de cada colonia o zona de población propuesta para el sector.
- Columna 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.
- Columna 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 las fórmulas 55 y 56.
- Columna 11. Se calcula el desequilibrio del sector propuesto con la fórmula 57.

$$Desequilibrio_i = \Sigma \text{Gasto disponible}_i (3) - \Sigma \text{Gasto requerido}_i (10)$$

ECUACIÓN 57

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, tomando siempre en cuenta el diagnóstico de la capacidad de producción de las fuentes de abastecimiento descrito en el capítulo 9.2.1.1. Cuando la diferencia sea positiva y relativamente cercana a cero, se prosigue 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 negativa, 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 de 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 de ser lo más sencilla posible y requerir un mínimo de infraestructura nueva.

9.2.1.3 Análisis de la capacidad de regulación de tanques por sector

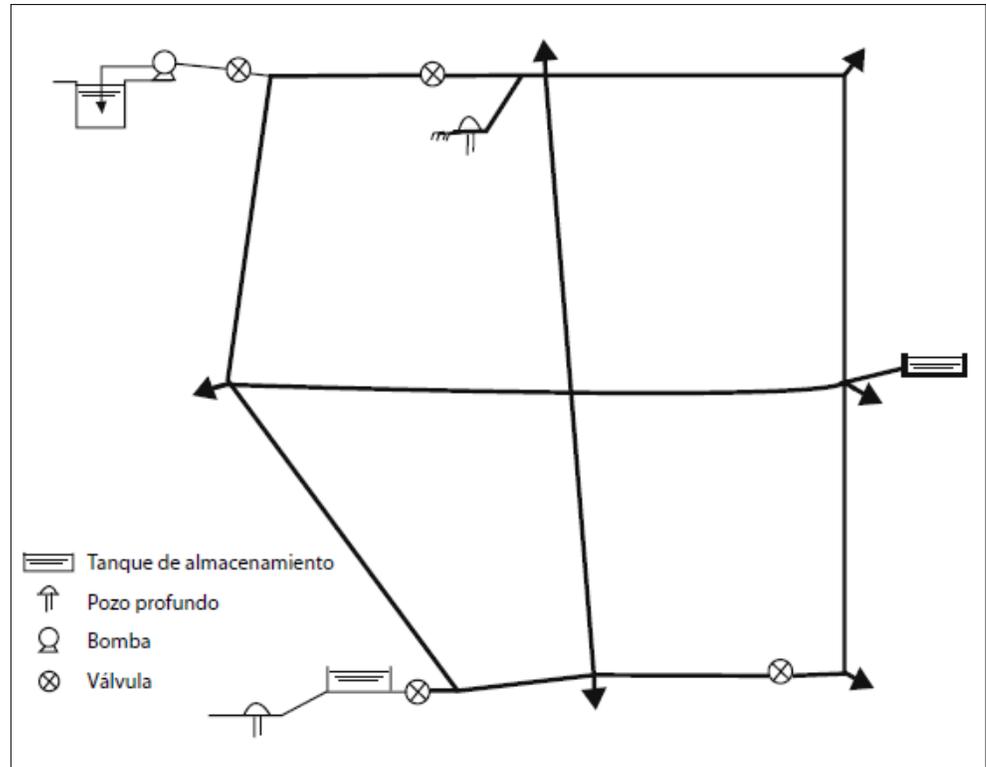
El procedimiento consiste en calcular el coeficiente de regulación en cada zona, utilizando la curva típica de demanda de agua (ver el capítulo 7.2.1.3) y la política de suministro de agua hacia el tanque. La capacidad requerida de almacenamiento del tanque, en metros cúbicos, será determinada multiplicando 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.

9.2.2 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.

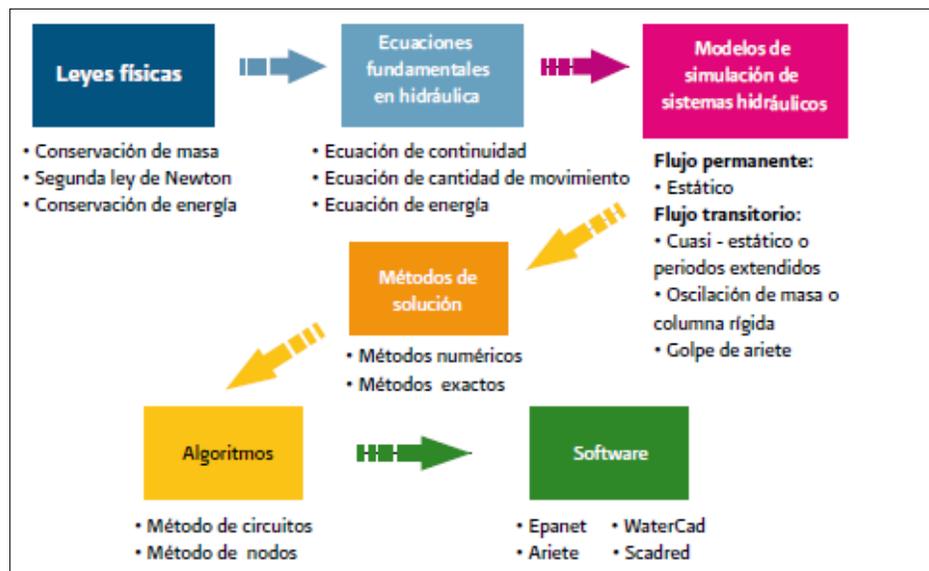
El modelo de una red de distribución de agua potable se construye mediante nodos, tramos, condiciones de frontera e iniciales. Los nodos pueden ser simples cuando solo representan uniones de tuberías, o bien, compuestos, cuando reproducen demandas de usuarios, fugas, tanques, depósitos, y cuerpos de agua (acuíferos, manantiales, presas, etc.). Los tramos pueden solo representar tuberías, o también tramos con válvulas y equipos de bombeo. En la figura 56 se muestra un ejemplo de un modelo hidráulico de un sistema de agua potable.

ILUSTRACIÓN 56 EJEMPLO DE UN MODELO DE UNA RED DE AGUA POTABLE



Las fases de la modelación de sistemas hidráulicos a presión se muestra en la figura 57, donde se observa que está basada en los principios básicos de la hidráulica: continuidad y cantidad de movimiento.

ILUSTRACIÓN 57 FASES DE LA MODELACIÓN DE LOS SISTEMAS HIDRÁULICOS A PRESIÓN



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 las ecuaciones 58 y 59.

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

ECUACIÓN 58

$$\sum_{j=1}^m \Delta H_j = 0$$

ECUACIÓN 59

Donde:

$Q_{i,j}$ = Gastos de las tuberías j , que entran y salen del nodo i (l/s).

Q_i = Gasto de demanda extraído de la red en el nodo i (l/s).

Δs_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, etc.

En cuanto a los consumos de los usuarios que se extraen por la 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 o a áreas tributarias o a la densidad de usuarios.

Cuando se trata de modelación en períodos 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 red²⁵.

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 el capítulo 9.2.6.3 del manual.
- 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 tuberías.

²⁵ En el Manual de Diseño de Agua Potable y Alcantarillado (MAPAS), editado por la CONAGUA, puede consultarse con mayor profundidad los procedimientos para conformar un modelo hidráulico de red.

- 5) Capturar los datos de los elementos frontera, tales como curvas de bombas, niveles de tanques, dimensiones de depósitos, etc.
- 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:

- a) Errores en la rugosidad de las tuberías por su edad o material.
- b) Errores en los diámetros y longitudes de las tuberías por su desconocimiento en el plano.
- c) Suposiciones equivocadas en la asignación de demandas de agua en los nodos
- d) Existencia de fugas ocultas en la red.
- e) Errores en las caracterizaciones hidráulicas de accesorios (válvulas, codos, reducciones y ampliaciones de tubos).
- f) 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 del capítulo 7.2 del presente manual.

Actualmente, existen en el mercado nacional varios paquetes de cómputo que permiten conformar modelos hidráulicos de redes en ambientes gráficos y realizan el cálculo de las variables de presión y velocidad de manera rápida. Estas ventajas pueden ser ahora aprovechadas para mejorar los análisis de redes complejas como las de las grandes ciudades, reproduciendo todos los tramos y elementos de estas redes de agua potable. Esto conlleva a potenciar la cantidad de alternativas de operación que se pueden analizar en el sistema de abastecimiento y se logran resultados de configuraciones de la red con una operación eficiente. Dentro de todos estos programas de cómputo destaca el denominado *Epanet*.

El *Epanet* es uno de los programas para el análisis de redes hidráulicas más difundido a nivel mundial. Ha sido desarrollado por la *Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (USEPA)* y es un programa de dominio público, por lo que puede ser gratuitamente copiado y distribuido. Fue inicialmente presentado en el año de 1993 como una herramienta de análisis para ayudar a las empresas abastecedoras de agua potable a mantener y mejorar la calidad del agua entregada a los usuarios a través de redes de distribución. La versión más reciente de este programa es la 2.0 del año 2000. Fue traducida al español por la *Universidad Politécnica de Valencia*, en España²⁶.

Aunque ni el autor del programa *Epanet*, ni la USEPA se hacen responsables de los resultados obtenidos con el Programa, éste ha sido extensamente probado en numerosos casos prácticos en el mundo.

El *Epanet* es un programa que proporciona un entorno integrado bajo ambiente *Windows* para la edición de los datos de entrada a la red y la visualización de resultados en una amplia variedad de formatos. Entre éstos se incluyen mapas de la red codificados por colores, tablas numéricas, gráficas de evolución, mapas de isolíneas, entre otros. No existe límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesarse y tiene amplia compatibilidad con el programa *AutoCad* para la visualización de la traza urbana como fondo y a escala real.

²⁶ Martínez F., 2002, *Epanet 2.0 en Español. Manual de Usuario. Departamento de Ingeniería Hidráulica, UPV.* <http://www.idmh.upvs.es/manual/EN2manual.esp.pdf>

9.2.3 Análisis hidráulico de la red sectorizada

Una vez creado y calibrado el modelo de simulación de la red de agua potable, se utilizará como base para el análisis hidráulico de las condiciones propuestas de sectorización. Los pasos para el análisis hidráulico de la red sectorizada son:

- a) Definición de condiciones generales de análisis.
- b) Representación del esquema de sectorización.
- c) Optimización del funcionamiento de la red de distribución.

9.2.3.1 Definición de condiciones generales de análisis

Las condiciones generales a definir son el periodo del análisis y la demanda base por nodo.

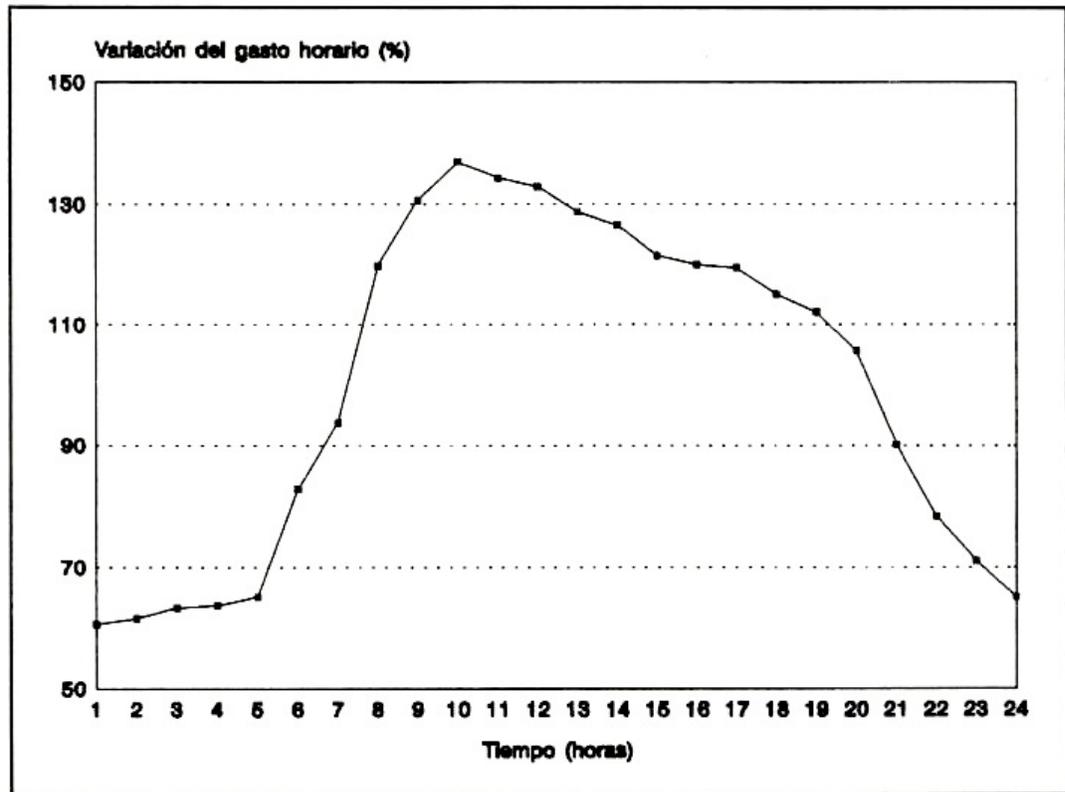
9.2.3.1.1 Período del análisis

Respecto al periodo del análisis, la red sectorizada se puede revisar en flujo permanente o en periodos extendidos de por lo menos 24 horas.

Análisis en flujo permanente.- Cuando se analice por flujo permanente se deberán de 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.

Análisis en periodo extendido.- 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 el capítulo 7.2.3 del manual). En caso de no contar con curva de variación se utilizará la curva recomendada por la CONAGUA en su libro de Datos Básicos, 2007 del *Manual de Diseño de Agua Potable y Alcantarillado*, de acuerdo al tamaño de la población (ver figura 58). Con este tipo de análisis se puede evaluar el comportamiento del nivel en los tanques y la posibilidad de paros en hora punta.

ILUSTRACIÓN 58
CURVA DE
VARIACIÓN DE LA
DEMANDA TÍPICA
(FUENTE:
CONAGUA)



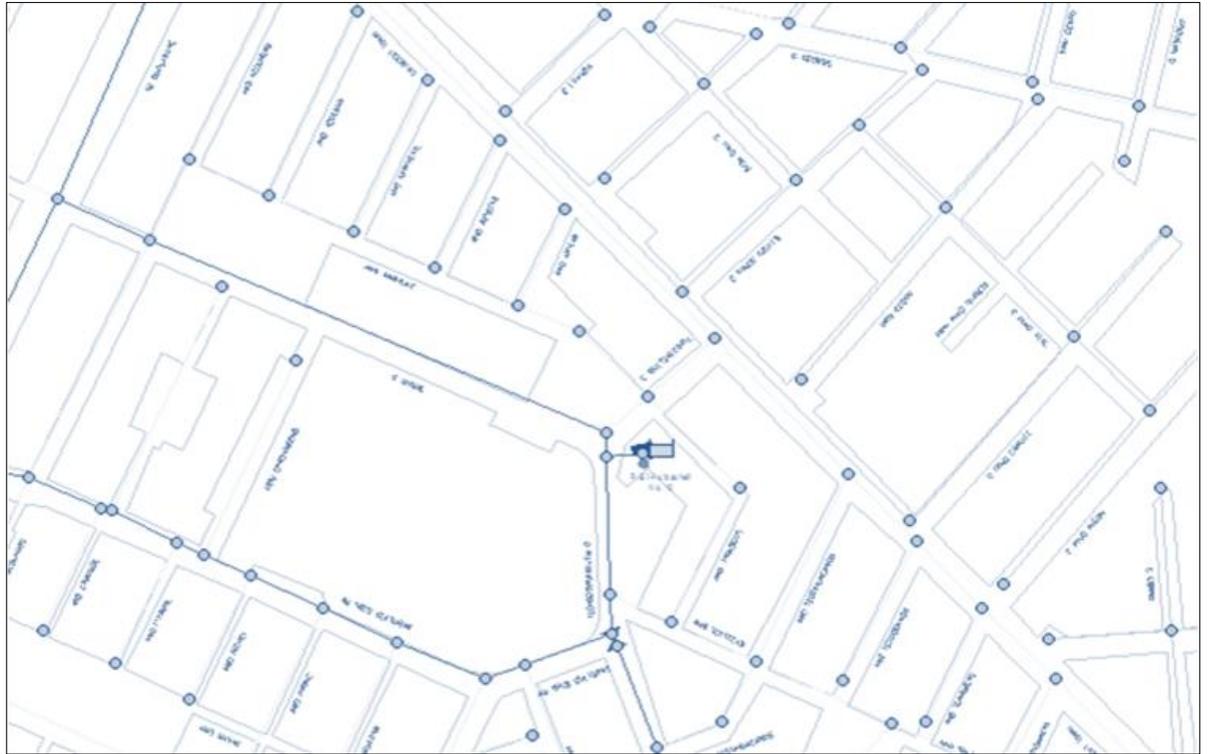
9.2.3.1.2 Demanda base por nodo

La demanda base de los nodos de consumo deberá de ser representativa de 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 (figura 59) y considerando que la distribución de usuarios también lo es, la asignación de demanda puede realizarse por sector de acuerdo a la ecuación 60.

$$Demanda \ x \ nodo = \frac{Dotación_{diseño} * Población_{sector \ n}}{86,400 * No \ Nodos_{sector \ n}}$$

ECUACIÓN 60

ILUSTRACIÓN 59
EJEMPLO DE
SECTOR CON
DISTRIBUCIÓN
DE NODOS
HOMOGÉNEA

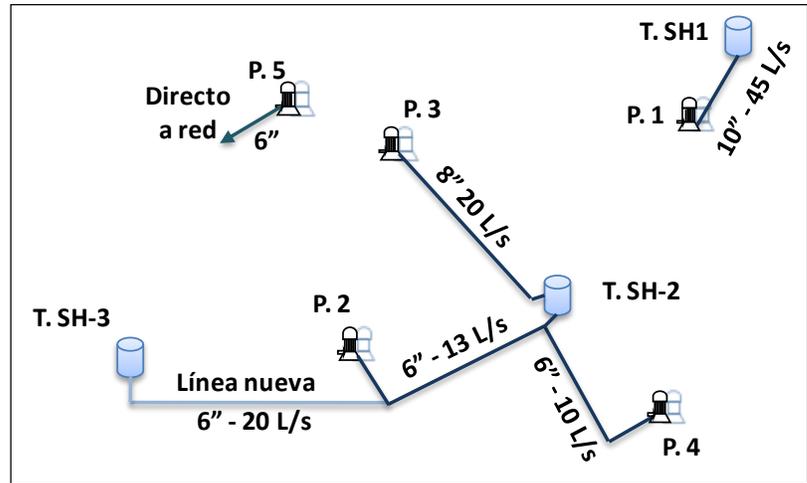


9.2.4 Representación del esquema de sectorización

Los cambios que se realicen en el modelo para representar el esquema de sectorización deben de 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 a representar 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, representando, aislando y verificando el funcionamiento de un sector a la vez.

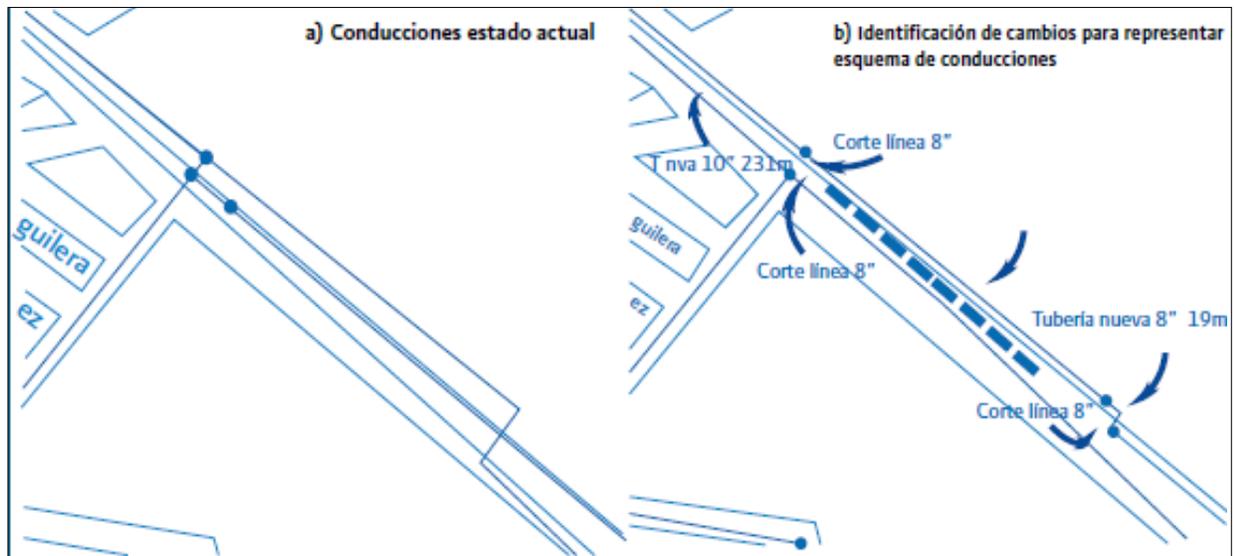
a) Definición y representación del esquema de entrega de agua en bloque. Se debe diseñar un esquema de entrega de agua en bloque que asegure que cada fuente de abastecimiento funcione de acuerdo a la redistribución de caudales propuesta. El esquema deberá representar las fuentes de abastecimiento, líneas de conducción, tanques y puntos de entrega a cada sector (figura 60). El esquema deberá de utilizar al máximo la infraestructura existente.

ILUSTRACIÓN 60 EJEMPLO DE ESQUEMA DE ENTREGA DE AGUA EN BLOQUE



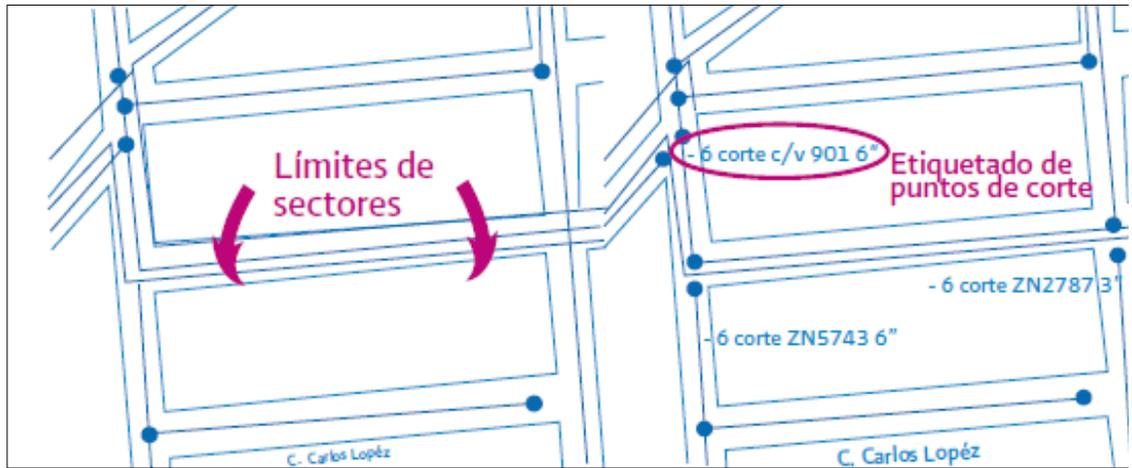
A partir del modelo de simulación creado, se identificarán los cambios necesarios para representar el esquema de entrega de agua en bloque. Los cambios incluyen cortes de derivaciones en ruta, modificación de cruceros y la instalación de líneas de conducción nuevas. Cada cambio deberá ser etiquetado para la posterior generación de volumen de obra (figura 61).

ILUSTRACIÓN 61 EJEMPLO DE AISLAMIENTO DE CONDUCCIONES PARA REPRESENTAR ESQUEMA DE ENTREGA DE AGUA EN BLOQUE



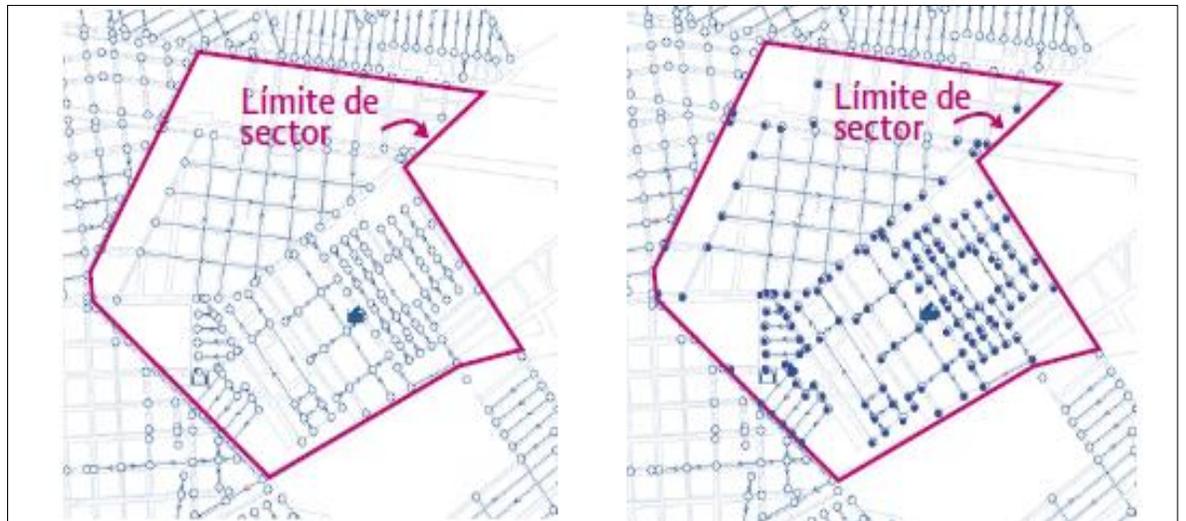
b) Delimitación y aislamiento de sectores. Se deben identificar los cambios necesarios para que cada sector funcione de acuerdo a la redistribución de caudales propuesta en el capítulo 9.2.1.2 del presente manual. Utilizando las herramientas del *software* de modelación, se deben de identificar los límites de cada sector para definir los puntos en que se realizarán los cortes, como se muestra en la figura 62.

ILUSTRACIÓN 62
IDENTIFICACIÓN DE LÍMITES DE SECTOR Y DEFINICIÓN DE PUNTOS DE CORTE



Para verificar el aislamiento del sector, se cerrarán o apagarán las fuentes de suministro de agua al mismo y se ejecutará el cálculo del modelo. El resultado esperado es que los nodos del sector en prueba no reciban gasto (figura 63).

ILUSTRACIÓN 63
COMPROBACIÓN DE AISLAMIENTO DE SECTOR



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 el capítulo siguiente.

9.2.4.1 Optimización del funcionamiento hidráulico de la red de distribución

A partir del punto de suministro de agua al sector, la red de distribución debe de ser capaz de entregar el gasto demandado en cada nodo con presiones mayores a 1.0 kg/cm² y menores a 5.0 kg/cm², tanto en las condiciones de máxima demanda, como en las condiciones de operación media y mínima. A continuación se dan algunas recomendaciones para controlar presiones mínimas y máximas.

9.2.4.1.1 Control de presiones bajas

Sistemas por gravedad con cotas menores al tanque de regulación.- Cuando existen zonas con presiones menores a 1 kg/cm² en este tipo de sistema, se utilizarán las herramientas del *software* de modelación para identificar las tuberías que abastecen dicha zona y que tienen una pérdida unitaria elevada debido a altas velocidades. Aquellas 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 tuberías nuevas, cambio de diámetro en tuberías con velocidades altas, o conexiones de cruceros desconectados. Todos ellos buscando generar la menor cantidad de obra posible. Este tipo de mejoras aplican para éste, y todos los tipos de sistemas que se presentan a continuación.

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 éste.

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.

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.

9.2.4.1.2 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 un punto óptimo donde tengan mayor área de influencia y genere la menor obra posible. El funcionamiento de estas válvulas deberá de ser propuesto y validado con el modelo de simulación. Todos los cambios realizados para la optimización de la red deberán de ser etiquetados e identificados en el modelo de simulación hidráulica y en los planos.

9.2.5 Análisis hidráulico de las conducciones para entrega de agua en bloque

Las conducciones deberán de 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:

1. Curva de gasto-carga de cada equipo de bombeo.
2. Cota de desplante del equipo de bombeo.
3. Nivel dinámico de succión de la bomba.
4. Cota de la descarga a tanques.
5. Diámetro y longitud de las tuberías.

6. 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.

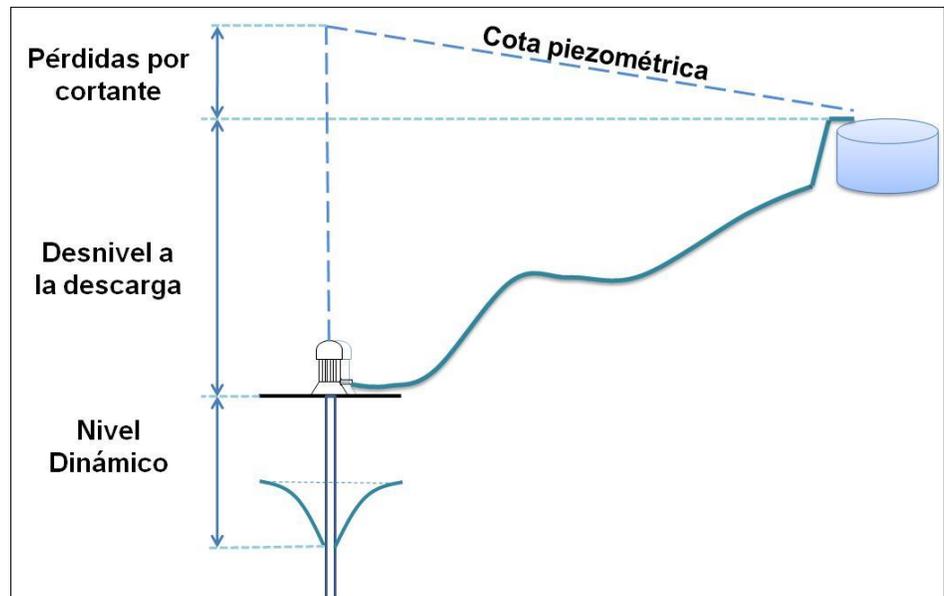
9.2.5.1 *Análisis hidráulico en flujo permanente de las conducciones*

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

9.2.5.1.1 *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 (figura 64). Con el uso del modelo de simulación se puede optimizar las condiciones de diseño mediante la realización de varias pruebas.

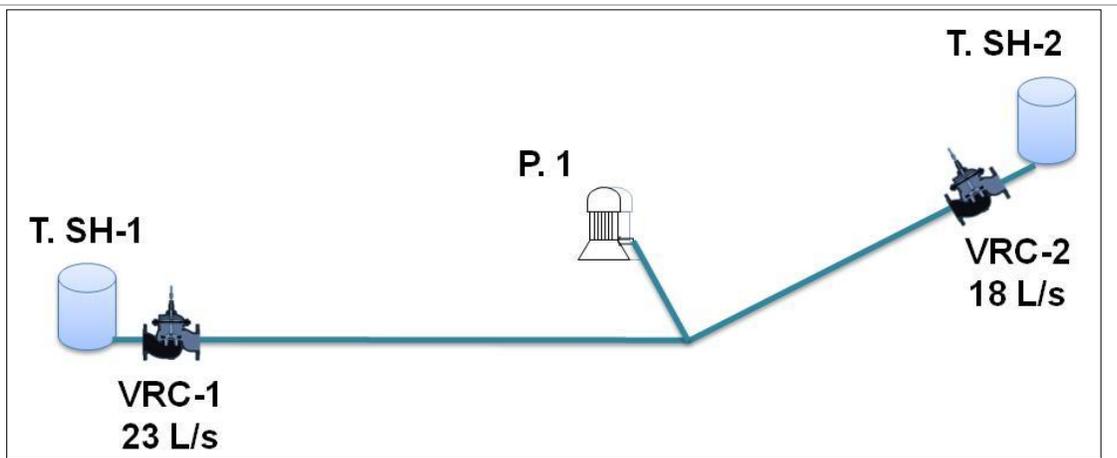
ILUSTRACIÓN 64 DEFINICIÓN DE LA CARGA DE DISEÑO PARA EQUIPOS DE BOMBEO



9.2.5.1.2 *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 (figura 65).

ILUSTRACIÓN 65
USO DE
VÁLVULAS
AUTOMÁTICAS
PARA LA
REGULACIÓN
DE CAUDAL



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 de corresponder al diseño del esquema de entrega de agua en bloque.

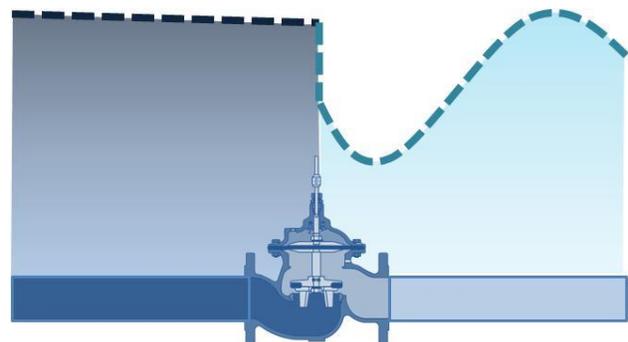
9.2.5.1.3 Control de velocidades y presiones

Si la velocidad en las tuberías 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.

9.2.5.2 Análisis hidráulico periodos extendidos de las conducciones

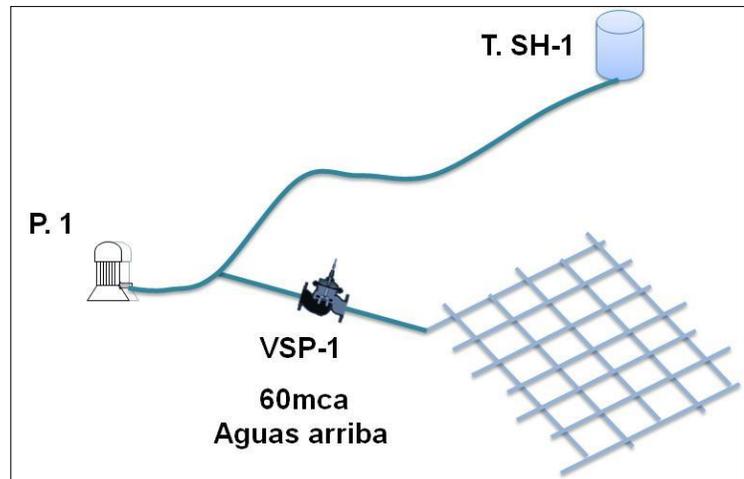
Cuando existe un sistema de conducción desde un equipo de bombeo hasta un tanque, el cual entrega en algún punto específico a la red, se puede realizar un análisis en periodo extendido. Para el correcto funcionamiento de la conducción es necesaria la instalación de una válvula sostenedora de presión, la cual será calibrada para mantener la presión aguas arriba para permitir que el sistema siga teniendo la capacidad de entregar hasta el tanque (figura 66).

ILUSTRACIÓN 66 FUNCIÓN DE VÁLVULA SOSTENEDORA
DE PRESIÓN



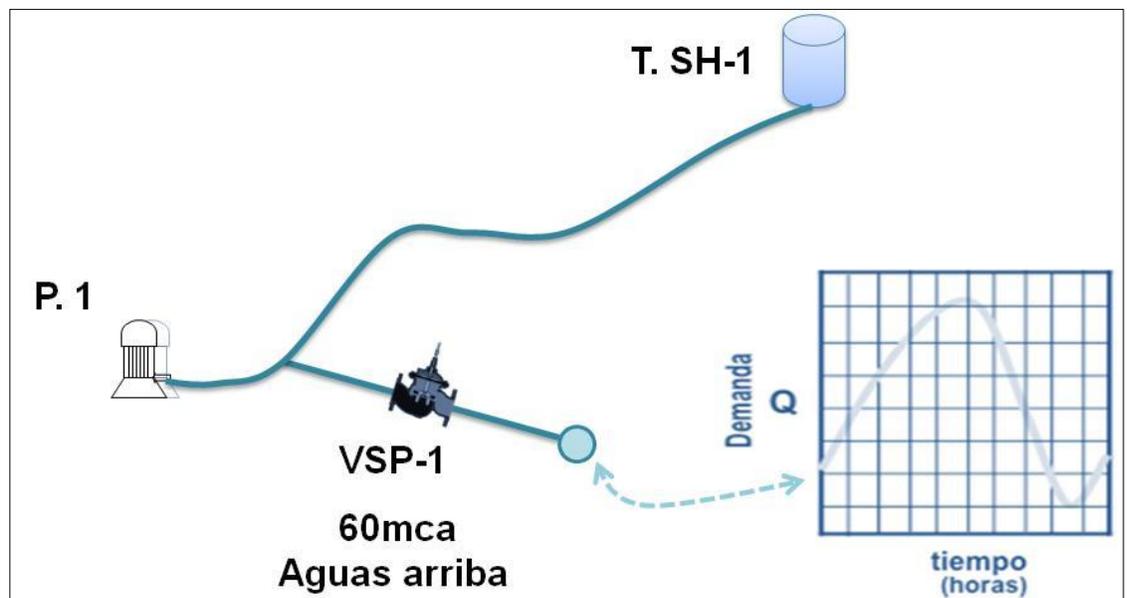
Este tipo de sistemas puede analizarse junto con la red de distribución en el capítulo 9.2.4.1, para tomar en cuenta las características de demanda de la zona a la que se inyecta de manera directa (figura 67).

ILUSTRACIÓN 67 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN CON ENTREGA DIRECTA A RED EN RUTA



El sistema puede analizarse también de manera aislada, colocando un nodo de consumo aguas abajo de la válvula sostenedora de presión, el cual represente el gasto demandado por toda la zona, así como la variación de la demanda horaria (figura 68).

ILUSTRACIÓN 68 ANÁLISIS DE SISTEMA CON REPRESENTACIÓN DE LA ZONA DE INFLUENCIA COMO UN NODO DE CONSUMO



El análisis de 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, el cual 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.

9.2.6 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, en las secciones siguientes del manual se desarrollan algunas estrategias generales para la puesta en marcha de la sectorización.

9.2.6.1 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.

Para cada una de las categorías deberá de definirse su costo total, tiempo de entrega (en los conceptos que aplique) y tiempo de instalación o construcción. Se deberá de tomar en cuenta también los tiempos de licitación y adjudicación de obra en aquellos conceptos que apliquen estas características.

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, con base en las características de cada categoría definida anteriormente. Así se obtiene la ruta crítica de la implementación del proyecto (figura 69).

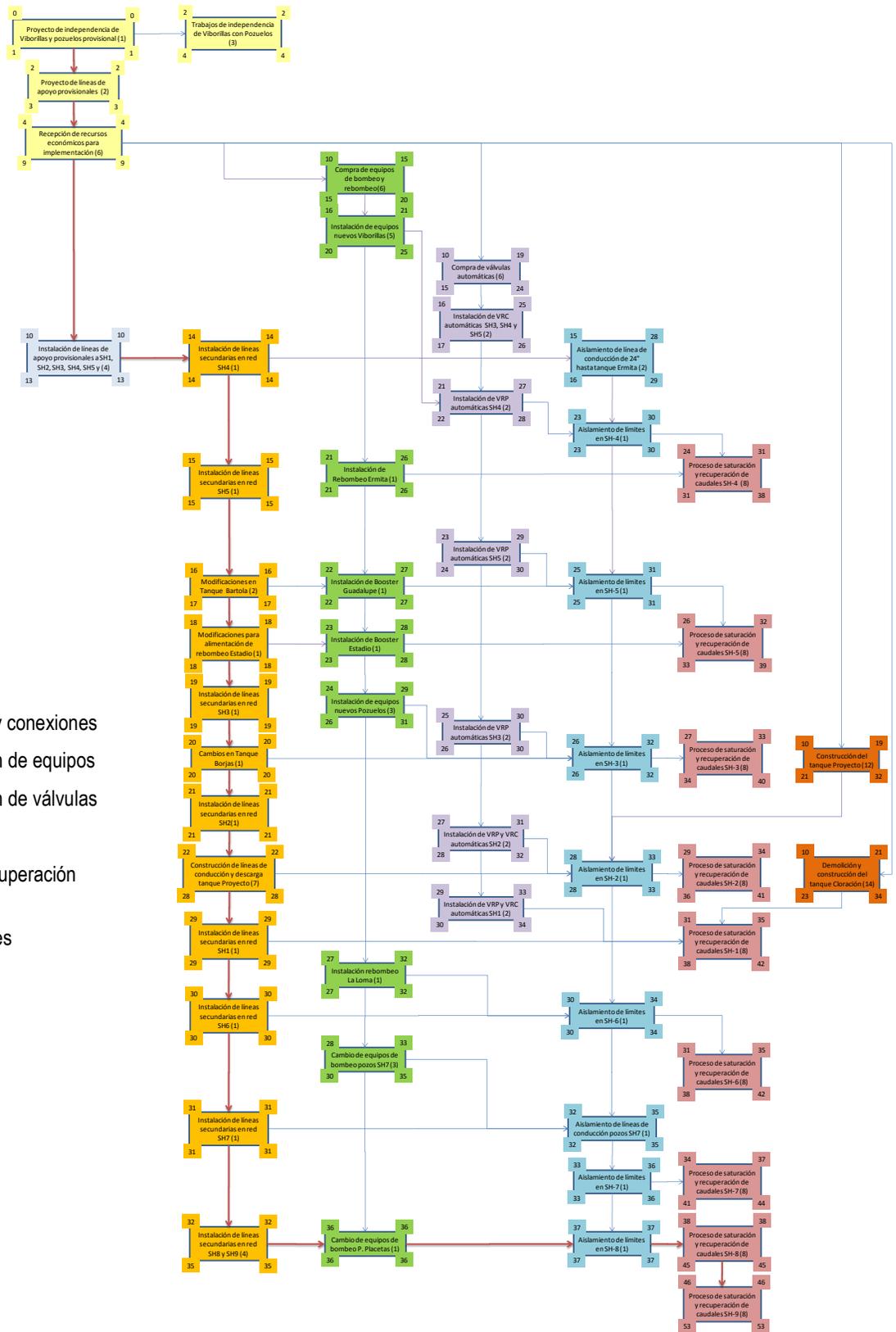


ILUSTRACIÓN 69 EJEMPLO DE DIAGRAMA DE FLECHAS Y RUTA CRÍTICA

En el diagrama de flechas se establece el orden y secuencia en que las actividades deberán de realizarse, así como las fechas de inicio y término. El diagrama de flechas deberá de tomarse como guía para la implementación y deberá de actualizarse y modificarse de acuerdo a los resultados e imprevistos que se presenten. A partir del diagrama de flechas se deberá realizar un calendario de actividades, en el cual se deberá identificar 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.

9.2.6.2 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:

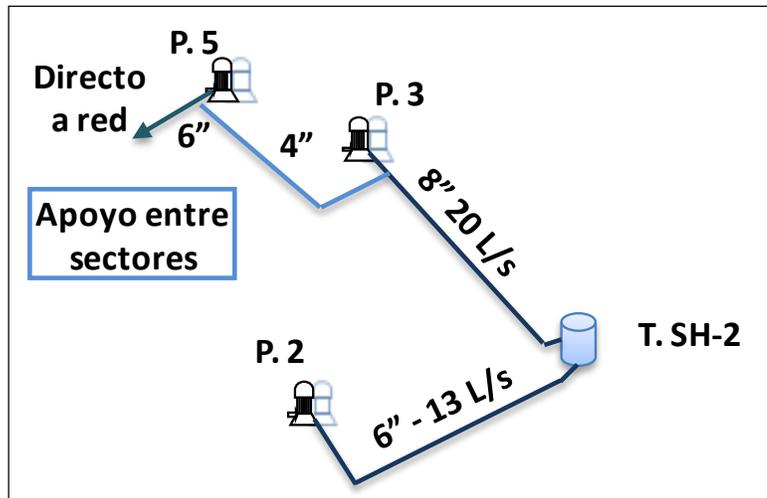
Cortes y modificaciones de cruceros para el aislamiento de sectores.- En este concepto se incluyen todos los trabajos relacionados con el establecimiento físico de los límites de sectores. Se recomienda realizar cortes definitivos en la red (figura 70) para los trabajos de aislamiento, ya que se ha observado 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.

ILUSTRACIÓN 70 TRABAJOS DE AISLAMIENTO DE SECTORES



Las preparaciones para el apoyo entre sectores para resolver eventualidades deberán proyectarse en el esquema de entrega de agua en bloque (capítulo 9.2.5 del manual). Deberá evitarse en medida de lo posible que se hagan conexiones entre las redes de distribución de los sectores (figura 71).

ILUSTRACIÓN 71 EL APOYO ENTRE SECTORES DEBERÁ PLANEARSE EN EL ESQUEMA DE ENTREGA DE AGUA EN BLOQUE



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 éstas 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 del catálogo de este concepto se deben identificar aquellas tuberías que son indispensables para cubrir zonas que pueden quedar sin alimentación debido a los trabajos de aislamiento. La instalación de estas tuberías deberá realizarse anterior a los cortes definitivos.

Construcción y rehabilitación de infraestructura (tanques, rebombes, cajas de válvulas). En este concepto se incluyen los trabajos de obra civil y fontanería general para el uso de infraestructura nueva o existente, como pueden ser tanques reguladores, cajas rompedoras de presión, rebombes 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.

9.2.6.3 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. Para permitir el mantenimiento de las válvulas, se recomienda el uso de *bypass* para permitir el acceso de flujo a la zona en caso de eventualidades o mantenimiento.

Capítulo 8

Eficiencia Energética

10 Eficiencia energética

10.1 Diagnóstico de eficiencia energética

El Diagnóstico de Eficiencia Energética (DEE) es la aplicación de un conjunto de técnicas para determinar el grado de eficiencia con la que es utilizada la energía en un sistema de agua potable, además de especificar cuánta de esa energía es desperdiciada. La parte concluyente del DEE es la identificación y cuantificación de medidas de bajo costo o con inversiones rentables para el ahorro de energía en las instalaciones de bombeo del sistema de agua potable, incluyendo todos los elementos consumidores de energía y sus respectivas pérdidas en la transformación energética.

10.1.1 Principios fundamentales de un Diagnóstico de Eficiencia Energética.

Antes de describir la metodología para realizar un Diagnóstico de Eficiencia Energética (DEE) es importante repasar dos principios básicos donde se fundamenta un DEE, que son:

- 1) **Balance general de energía.**- Con el cual se determina los sistemas de mayor consumo de energía dentro de un sistema de abastecimiento de agua potable y saneamiento, y ayuda a priorizar los sistemas sobre los cuales se debe realizar el DEE.
- 2) **Balance de Energía en un sistema de bombeo.**- Con el cual se determina la distribución de las pérdidas de energía a lo largo de las componentes de un sistema de bombeo y sobre el que se fundamenta la metodología del DEE.

10.1.1.1 Balance General de Energía en un sistema de abastecimiento de agua potable y saneamiento.

Generalmente un sistema de abastecimiento de agua y saneamiento está compuesto por etapas que se pueden resumir en: Captación, Acondicionamiento, Conducción, Distribución, y Saneamiento y Manejo de agua pluvial.

En cada una de estas etapas se lleva a cabo una cadena secuencial de operaciones que incluyen en la mayoría de ellas el consumo de energía, dependiendo del tipo de operación que se realice. En la tabla 54 se muestra las etapas típicas que conforman un sistema de abastecimiento de agua potable y saneamiento, describiendo el tipo de operación que se realiza, los elementos o sistemas de consumo de energía y el impacto típico que representa el consumo de energía de cada tipo de operación respecto al consumo total de energía del sistema de abastecimiento de agua potable.

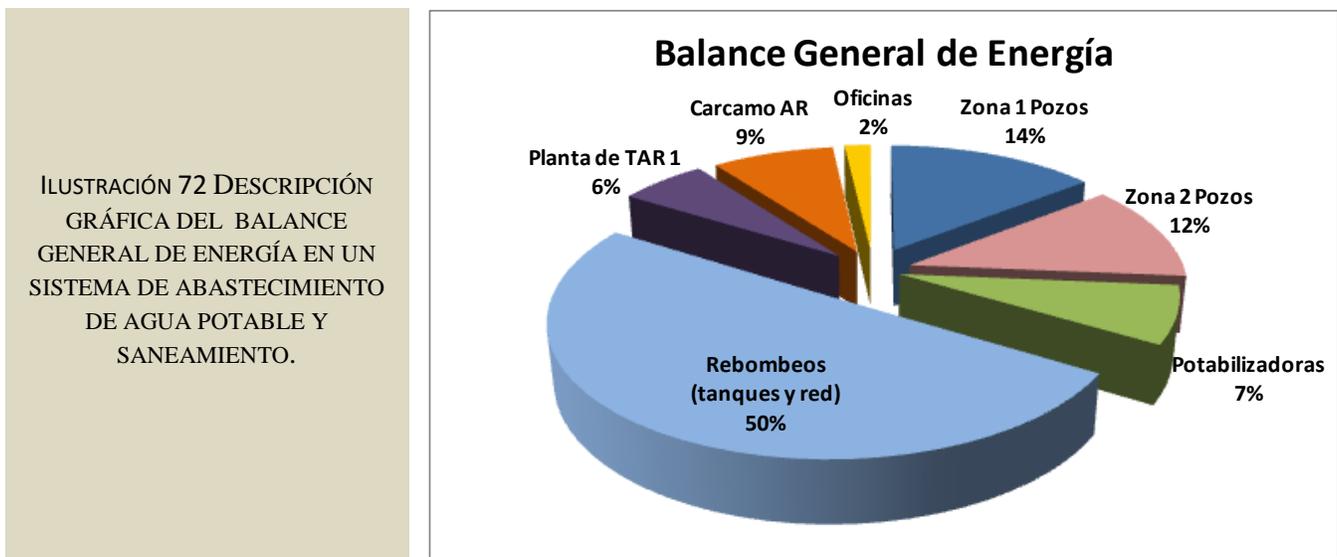
Etapa	Nombre de la Operación	Descripción de la operación	Sistemas de consumo de energía más utilizados	Impacto Estimado sobre el consumo global de ENERGÍA (%)
Captación	Extracción de Pozo profundo	Extraer el agua a la superficie bombeando el agua cruda desde el nivel dinámico de un pozo profundo	Sistemas de bombeo de pozo profundo sumergibles o de turbina de flecha	30-60
	Captación de fuente superficial	Captar el agua cruda de una toma de río, manantial u otra fuente superficial y bombearla a la planta potabilizadora	Sistemas de bombeo centrífugos horizontales o verticales	0-10
Acondicionamiento	Desinfección	Implica la dosificación de cloro o algún otro proceso como la ozonación para lograr los niveles de desinfección requeridos por las Normas Locales	Bombas de dosificación tipo pistón	1-2
	Potabilización	Implica el procesamiento del agua cruda en una Planta de tratamiento primario o secundario	Sistemas de bombeo, ventiladores, agitadores, sopladores centrífugos	5-10
Conducción	Envío del agua potable a la red de distribución	Bombeo del agua potable de las plantas potabilizadoras a tanques de regularización o directamente a la red	Sistemas de bombeo sumergibles o de turbina de flecha. Sistemas de bombeo centrífugos horizontales o verticales	0 - 40
Distribución	Almacenamiento	Implica la operación y el mantenimiento de los tanques y cárcamos de almacenamiento incluidos en el sistema	No aplica	NA
	Rebombeo	Bombeo a zonas de mayor altura desde los tanques de regularización, cárcamos de almacenamiento o directamente de la red	Sistemas de bombeo centrífugos horizontales o verticales	5-35
Saneamiento y manejo de agua pluvial	Captación de Aguas Residuales y pluviales	Mantenimiento y operación del sistema de alcantarillado y recolección de aguas servidas	Motores de combustión interna	NA
	Almacenamiento de aguas residuales y/o pluviales	Mantenimiento y operación de los cárcamos de bombeo de agua residual	No aplica	
	Conducción de Aguas Negras y/o pluviales	Bombeo de las aguas residuales desde los cárcamos hasta las plantas de tratamiento o cuerpos de agua	Sistemas de bombeo centrífugos horizontales o verticales	5- 25
	Tratamiento y disposición de aguas residuales	Procesos de tratamiento de aguas residuales para cumplir las normas oficiales locales , incluye	Sistemas de bombeo, ventiladores, agitadores, sopladores centrífugos	0 – 15

		los sistemas de bombeo asociados		
Otras operaciones	Telemetría y Control	Incluye el consumo mínimo de energía para suministrar energía a los sistemas de transmisión y registro	Sistemas de iluminación, equipos electrónicos y computadoras, y en algunos casos sistemas de aire acondicionado.	2-3
	Operaciones adicionales	Incluyen el resto de las actividades de orden administrativo, comunicación social, etc.		

TABLA 54 ETAPAS Y TIPO DE OPERACIÓN DE CONSUMO DE ENERGÍA EN UN SISTEMA DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO

Como se puede observar en la tabla 54, el mayor consumo de energía se lleva a cabo en las operaciones que implican la utilización de Sistemas de Bombeo. Al inicio del DEE, se recomienda analizar la distribución del consumo de energía a lo largo del sistema de agua potable y saneamiento en evaluación. A esto se le conoce como análisis del balance general de energía.

Con el balance general de energía se identifican las instalaciones que tienen los mayores consumos energéticos, el resultado de esta evaluación servirá de base para la planeación del DEE. En la figura 72, se muestra un balance típico en un sistema de agua potable y saneamiento.

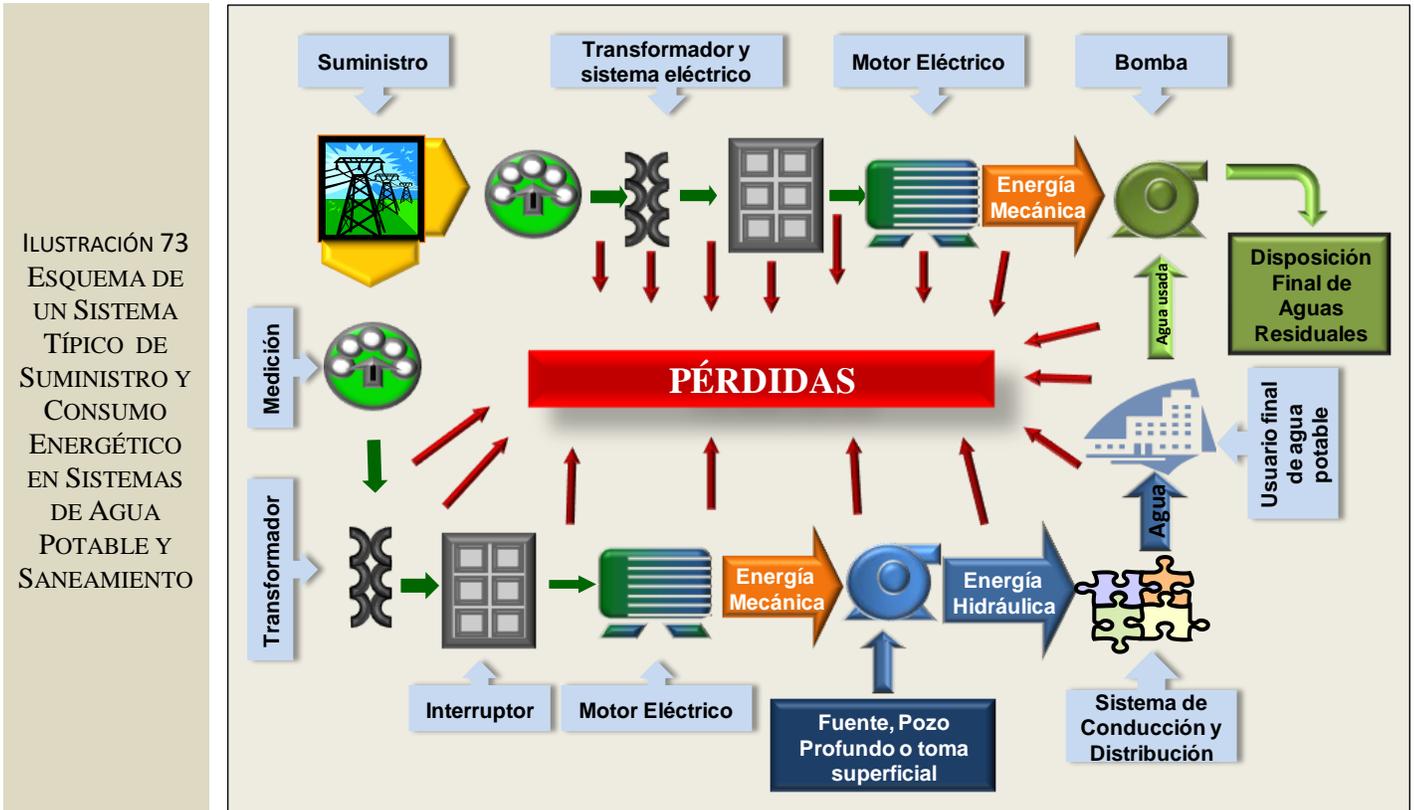


Como se puede observar en el ejemplo de la figura 72, el mayor consumo de energía se presenta en la operación de los pozos en las zonas 1 y 2, así como en los sistemas de rebombeo en la parte de la conducción y distribución, lo cual representa el 76% de la energía consumida. De acuerdo a esto se debe priorizar realizar el DEE primero en los rebombes y luego en la operación de los pozos zona 1 y zona 2. De esta manera y de acuerdo al resultado del DEE, trabajando prioritariamente en estos sistemas de bombeo, se podría lograr ahorros significativos concentrando los recursos en un proyecto de eficiencia energética que daría resultados en un corto plazo.

10.1.1.2 Pérdidas energéticas en sistemas de bombeo, (Balance de Energía en un sistema de bombeo)

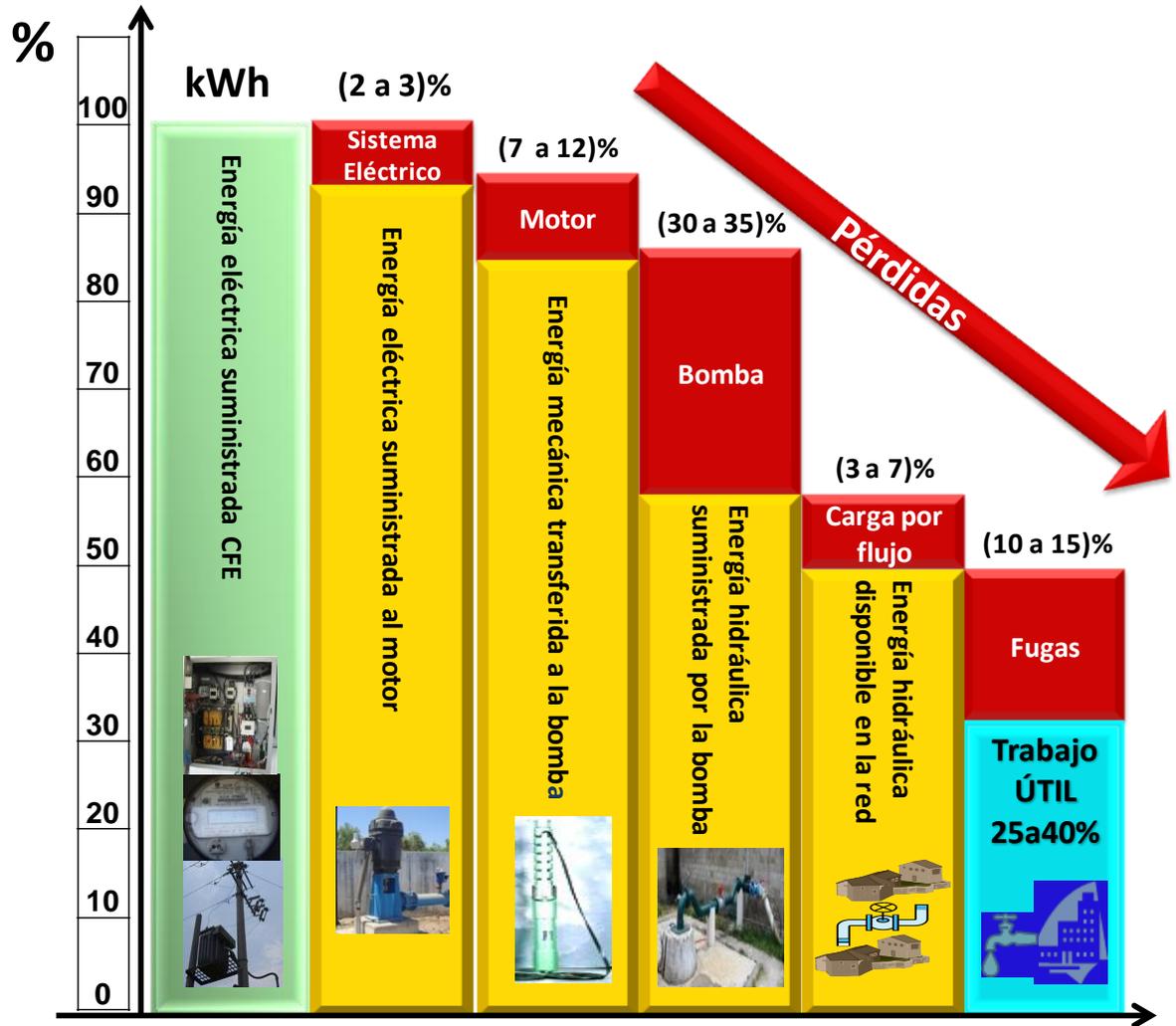
De acuerdo a lo mencionado anteriormente, típicamente los Sistemas de Bombeo son los que presentan un mayor consumo de energía, debido a esto, el DEE se centra en el análisis de la transformación y utilización de la energía dentro de un sistema de bombeo.

Los principales elementos para el suministro y transformación energética en un sistema de bombeo, necesarios para la producción, suministro y tratamiento de agua, se muestran esquemáticamente en la figura 73, en la cual se puede observar la cadena de equipos desde el medidor de consumo del suministrador de energía, pasando por el transformador, el centro de control del motor y sus elementos correspondientes, el motor eléctrico, la bomba y la disposición final del agua potable y residual.



De esta manera se puede obtener un desglose de las pérdidas energéticas típicas que se tienen por la utilización de la energía en cada uno de los elementos de un sistema de bombeo, y en el sentido de flujo de su utilización, como se muestra en la figura 74.

ILUSTRACIÓN 74
 FLUJO DE
 PÉRDIDAS Y
 CONSUMO
 ENERGÉTICO
 TÍPICO, EN LOS
 COMPONENTES
 DE UN SISTEMA
 DE BOMBEO.



La figura 74 se explica en el siguiente proceso:

1. Del 100% de energía suministrada a por CFE y demandada por el sistema de bombeo (primera barra), una parte se pierde en las componentes del sistema eléctrico como son el cableado, centro de control de motores, arrancador y demás componentes de la instalación eléctrica, quedando una parte menor de la energía eléctrica que se suministra al motor (segunda barra);
2. Posteriormente el motor utiliza la parte de energía suministrada en sus componentes electromagnéticos y de enfriamiento para realizar el proceso de transformación de energía eléctrica a mecánica, y pierde otro porcentaje de energía (del 7 al 12%), transmitiendo el resto a la bomba en forma de energía mecánica (tercera barra);
3. La bomba recibe esta energía mecánica y a través de los impulsores y componentes mecánicos la utiliza perdiéndose otro porcentaje importante de energía (del 30 al 35%) transformándola en energía hidráulica (flujo y carga), que se transmite al sistema de conducción y distribución de agua en forma de flujo y carga de presión (cuarta barra);

4. En las líneas de conducción y tuberías de distribución se tiene una pérdida de carga debida al efecto de la fricción del flujo sobre las paredes de la tubería además de las pérdidas de carga en distintas componentes de la red de distribución (válvulas, codos, derivaciones, reducciones, etc.), quedando una parte de la energía hidráulica disponible en la red de distribución (quinta barra);
5. Por último las fugas de agua en la red también representan una pérdida de flujo y carga, por lo que realmente al final del 100% de la energía suministrada solamente queda como Trabajo Útil que se puede definir como el Trabajo de Bombeo mínimo necesario para abastecer de agua al usuario final, un porcentaje del orden de entre 25 al 40%.

Adicionalmente en la figura 74, se observa que las mayores pérdidas de energía se presentan durante la transformación de energía mecánica en hidráulica (bomba a red hidráulica), que en algunos casos alcanza valores de entre 40 y 45%. Aunque, una vez recibida la energía en el motor eléctrico, no es extraño encontrar sistemas de bombeo con pérdidas de hasta el 60%. En ese rango de 40 – 45% precisamente se encuentran las oportunidades que se exploran más adelante como producto de la optimización de la operación hidráulica combinadas en el proyecto de eficiencia integral (capítulo 10), donde también se tienen oportunidades de ahorro de energía importantes.

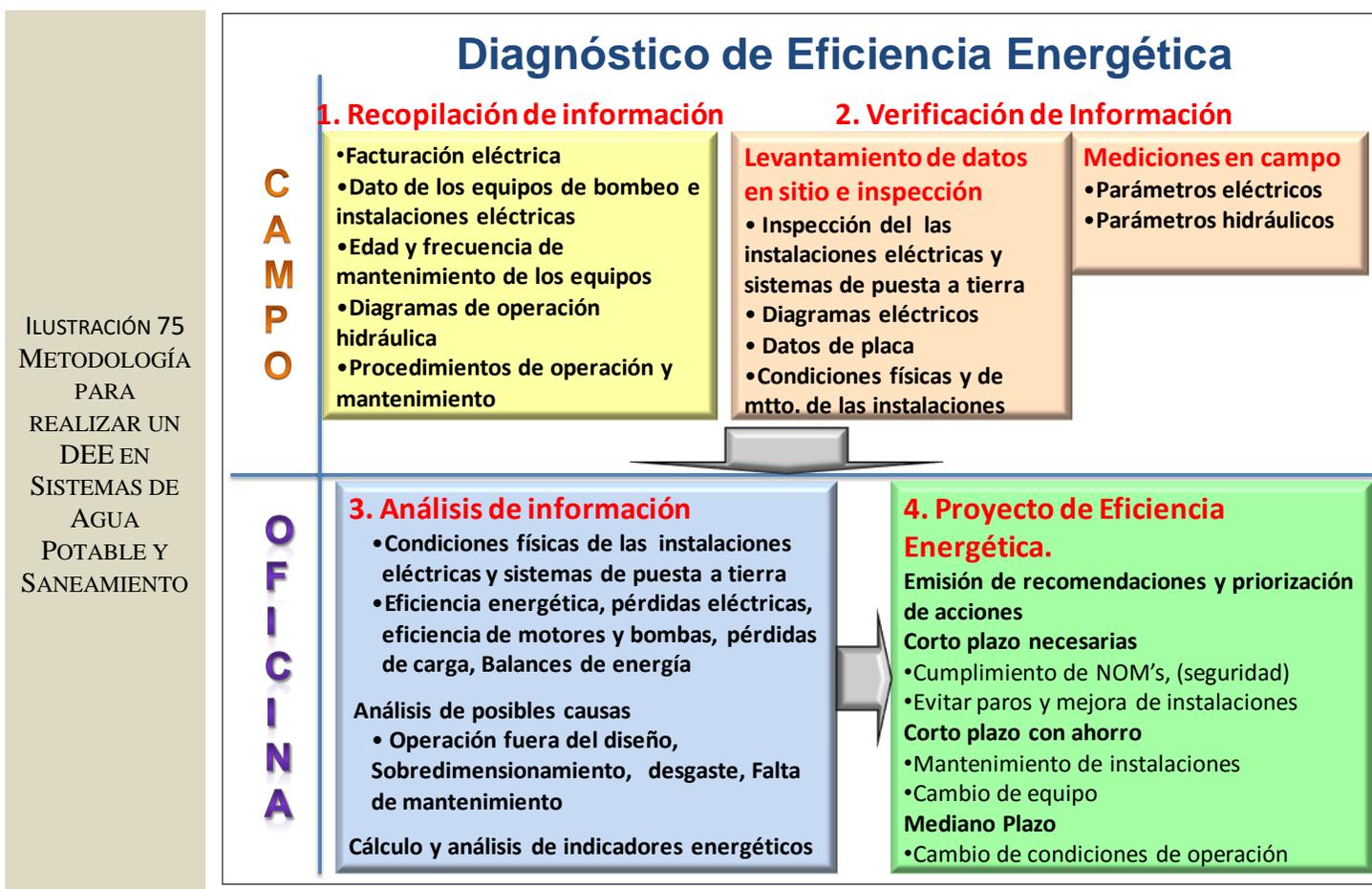
El balance de energía en un sistema de bombeo, consiste en el análisis crítico de todos los componentes en una instalación consumidora de energía, para determinar dónde y cómo es utilizada la misma, además de especificar cuanta es desperdiciada.

Basado en lo indicado anteriormente, el Diagnostico de Eficiencia Energética en un sistema de bombeo debe basarse en el análisis del Balance de Energía, es decir el análisis del consumo y pérdidas de energía en cada una de las componentes del sistema, desde el suministro de energía eléctrica, las componentes y en orden del flujo de energía, las cuales son: Suministro eléctrico, Motor Eléctrico, Bomba, Tuberías y Elementos Hidráulicos.

En el capítulo siguiente se explicará en forma detallada la metodología para elaborar un DEE.

10.1.2 Metodología para elaborar un DEE

Para ejecutar un DEE se sugiere seguir una secuencia ordenada que lleve a mejores resultados. Dicha secuencia requiere realizar por un lado, trabajos de campo como los descritos en el capítulo 7.1 y 7.2 del presente manual, y por otro, actividades de gabinete como las indicadas en este capítulo. En la figura 75 se muestra un diagrama que indica a manera de resumen las actividades a realizar, así como la secuencia de ejecución.



De acuerdo a esta metodología las primeras dos actividades que se requiere realizar son actividades de campo mediante la recopilación de información y la verificación de la misma mediante campañas de inspección y medición en campo de los sistemas de bombeo. La información, formatos de recopilación y especificaciones de cómo obtener los datos necesarios para el DEE se encuentran descritos en su totalidad en las secciones 6.1 y 6.2 del presente manual.

Con la información recopilada y verificada de las actividades 1 y 2 de esta metodología se debe realizar un análisis de la información en dos actividades primordiales.

- 1) Análisis de las condiciones físicas y operativas de las instalaciones eléctricas y mecánicas.
 - a. Evaluación con la NOM-001-SEDE-2005, Actualizada en Mayo de 2013 como NOM-001-SEDE-2012, "Instalaciones eléctricas (utilización)"
 - b. Calidad de energía y sistema de puesta a tierra.
 - c. Evaluación de las prácticas de mantenimiento predictivo y correctivo.
- 2) Análisis de eficiencia energética.
 - a. Balances de energía de los sistemas de bombeo
 - b. Observaciones generales de operación
 - c. Oportunidades de Ahorro de Energía
- 3) Cálculo de indicadores Energéticos.

Este análisis debe realizarse en forma ordenada, conviniendo realizar dicho análisis mediante el diagnóstico de cada componente del sistema de bombeo que basado en la distribución de pérdidas descrita anteriormente, el DEE en un sistema de bombeo estará compuesto de lo siguiente:

1. Diagnóstico del sistema eléctrico, incluyendo el contrato de suministro, la inspección de las instalaciones eléctricas y sistemas de puesta a tierra, y la evaluación de las pérdidas de energía en las componentes de dichas instalaciones eléctricas.
2. Diagnóstico energético de motores eléctrico, incluyendo la determinación de la eficiencia del motor y las pérdidas de energía en esta componente.
3. Diagnóstico energético de la bomba, incluyendo eficiencias, condiciones de operación y aspectos de mantenimiento.
4. Diagnóstico energético en el sistema de conducción y distribución de agua.

En las secciones siguientes se describe en forma detallada los análisis y diagnósticos arriba mencionados.

10.1.3 Diagnóstico del Sistema Eléctrico

Las principales áreas de oportunidad de eficiencia energética, derivadas de mejorar los parámetros de facturación y los componentes del sistema eléctrico, previos al conjunto bomba – motor, requiere el análisis y evaluación de los siguientes aspectos:

1. Evaluación de cumplimiento de las instalaciones eléctricas y sistemas de puesta a tierra con la NOM-001-SEDE-2005, Actualizada en Mayo de 2013 como NOM-001-SEDE-2012, “Instalaciones eléctricas (utilización)”
2. Análisis de la calidad de la energía.
3. Análisis del factor de potencia
4. Evaluación de pérdidas en conductores eléctricos

10.1.3.1 Evaluación de cumplimiento de las instalaciones eléctricas y sistemas de puesta a tierra.

El método²⁷ para la evaluación de instalaciones eléctricas y sistemas de puesta a tierra, considera dos aspectos:

1. Seguridad para el personal que las opera y controla.
2. Seguridad de las propias instalaciones tomando en cuenta que finalmente esto influye en forma determinante en la continuidad del servicio.

La evaluación comprende las revisiones de la documentación e inspección de campo de las instalaciones descritas en las secciones 6.1, y 6.2.3, obteniendo la siguiente información.

- Dibujos y diagramas unifilares de las instalaciones
- Memoria técnica
- Memoria de media tensión
- Comprobación de pruebas de medición de parámetros eléctricos.
- Visita de inspección considerando los siguientes aspectos (tablas 11 y 12):

²⁷ El respaldo es la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2005, “Instalaciones eléctricas (utilización)”, Actualizada en Mayo de 2013 como NOM-001-SEDE-2012 con la cual se debe cumplir obligatoriamente, y que tiene por fin garantizar los dos puntos señalados. Se contemplan todas las instalaciones eléctricas desde la acometida con el organismo suministrador (CFE) hasta el motor eléctrico del equipo de bombeo.

1. Valores y estado de las protecciones.
2. Los conductores, características y calibre.
3. Las canalizaciones tipo y estado físico.
4. Los equipos de control.
5. Las instalaciones de media tensión.
6. Mediciones de sistemas de puesta a tierra.

Una vez obtenidos los datos arriba mencionados en gabinete se señala el respaldo del incumplimiento en su caso con respecto a la NOM detallando en qué consiste y como debe estar resuelto para que cumpla con la garantía de seguridad para personas y equipos. En la figuras 76 y 77, se presentan algunas fotografías de anomalías en instalaciones eléctricas.

ILUSTRACIÓN 76
EJEMPLOS DE
ANOMALÍAS
MÁS COMUNES
EN
INSTALACIONES
ELÉCTRICAS.



No existen canalizaciones adecuadas



Las conexiones con el motor están expuestas a la intemperie y no hay cable desnudo de tierra física para regreso de falla.

ILUSTRACIÓN 77
EJEMPLOS DE
ANOMALÍAS
MÁS COMUNES
EN
INSTALACIONES
ELÉCTRICAS.



No existe cable desnudo para aterrizar el tablero principal, y no existe conductor de puesta a tierra junto con los demás conductores.



No hay conexión de puesta a tierra del X0 y Neutro del Transformador

Es de señalarse que el incumplimiento con la NOM en lo que se refiere a protecciones es la causa mayor de daños en las mismas que implican paros de equipo y de servicio por un lapso importante de tiempo. También el uso de calibres de conductores no cumpliendo con la NOM representa daños por interrupciones por largo tiempo.

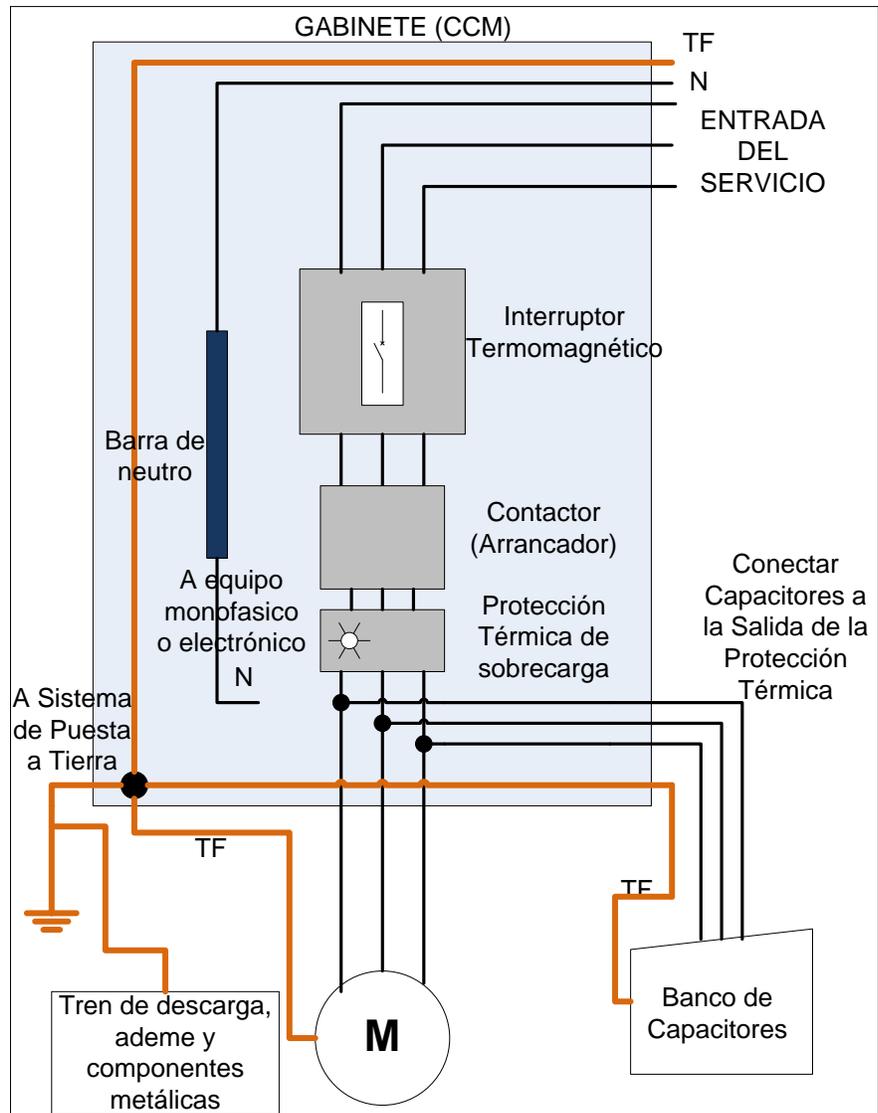
Los aspectos más importantes que se deben considerar para el cumplimiento con la normatividad de las instalaciones eléctricas y sistemas de puesta a tierra de los sistemas de bombeo, se presentan a continuación.

- a) Los conductores deben ser adecuados para el servicio, su aislamiento debe resistir las condiciones de instalación, si es tipo THW-LS no debe instalarse directamente a la intemperie a menos que esté protegido por una canalización, o como en el caso de los conductores para bomba sumergible mediante una cubierta especial.
- b) Las canalizaciones deben ser completas entre equipos y puestas a tierra, el calibre de los conductores debe ser conforme al señalamiento de la NOM que es el 125 % del valor nominal de la corriente en tabla para la capacidad del motor, la protección de sobrecarga del motor debe estar calibrada como máximo a su capacidad nominal.
- c) La limpieza de las instalaciones eléctricas es un punto importante que refleja el mantenimiento y cuidado que se tiene de las mismas, la falta de este es causa de prevención de fallas, ya que denota ignorancia de la operación y comportamiento de las instalaciones.
- d) En todos los casos debe calibrarse la protección térmica del motor tomando como base la corriente nominal correspondiente a la capacidad del motor instalado y que aparece en la placa del motor, en el caso que no sea posible obtener dicho valor de calibración por no permitirlo la protección térmica, debe ser sustituida en el arrancador; para el caso de variador de velocidad, la calibración de la corriente máxima permitida es un parámetro del variador, así como el Factor de Potencia deseado, en todos los casos debe tomarse en cuenta la corriente corregida cuando es afectada por los capacitores para mejora del Factor de Potencia

- e) Como punto complementario de lo anterior se tendrá la falta de observación de conexiones que por falta de apriete ocasionan desbalanceo entre fases y por ende baja en la eficiencia, además del problema físico de quemazón de conductor, esto se puede comprobar con las mediciones de temperatura realizadas en el capítulo 7.2.3.
- f) Empezando por la acometida de media tensión conectando a tierra los apartarrayos, que siempre deben existir en la acometida del servicio, con el objeto de mitigar las variaciones de tensión ocasionadas por descargas atmosféricas o transitorios, el equipo de media tensión en sus partes que no conducen la electricidad deben estar conectados al mismo sistema de puesta a tierra para evitar elevaciones de tensión en caso de falla.
- g) Los bornes XO de los transformadores deben estar directamente conectados a un sistema de puesta a tierra eléctrico para evitar variaciones de tensión en los equipos, sobre todo en los electrónicos como los variadores de velocidad, y del mismo borne debe llevarse un conductor desnudo para la conducción de corriente en caso de falla a tierra de dichos equipos.
- h) El conductor desnudo para la conducción de corriente de falla debe tener continuidad hasta el motor del equipo de bombeo para la corriente de falla se haga sentir en el sistema eléctrico provocando así el disparo de las protecciones.
- i) Es fundamental como lo señala la NOM-001- SEDE, Actualizada en Mayo de 2013 como NOM-001-SEDE-2012 que todos los sistemas de tierra estén interconectados entre sí, para lo cual en campo se realizan las mediciones de continuidad entre todos los puntos que deben estar conectados a tierra (tabla 11), de modo que si existe diferencia de valores de continuidad a tierra esto es indicio de su falta de conexión y por lo tanto se reporta para que se corrija, evitando de esta manera diferencias de potencial que dañan equipos electrónicos o retardan la operación de las protecciones en caso de falla a tierra con el consiguiente daño de los mismos.
- j) Es importante señalar que la interconexión con el ademe de los sistemas de puesta a tierra permiten obtener el mayor beneficio de la puesta a tierra.

En la figura 78 se presenta en forma esquemática la interconexión que debe existir entre los sistemas de puesta a tierra mediante cable desnudo, y que se menciona en los puntos

ILUSTRACIÓN 78 ESQUEMA DE INTERCONEXIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN UN SISTEMA TRIFÁSICO, CON LAS COMPONENTES DE LAS INSTALACIONES.

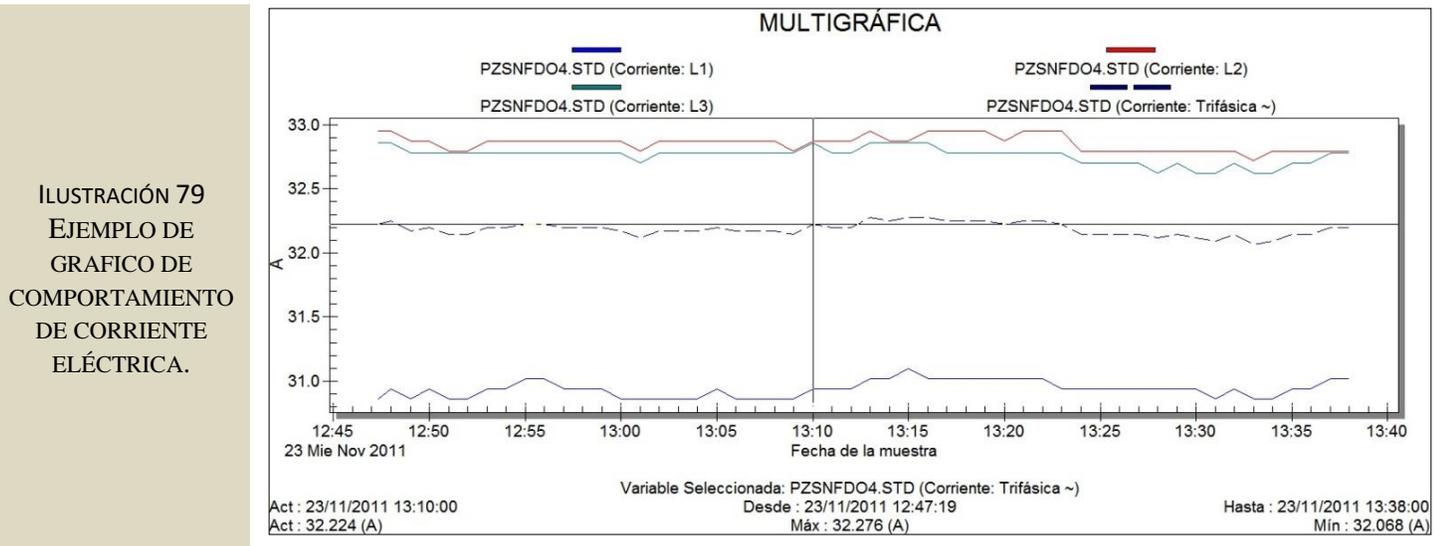


10.1.3.2 *Análisis de la calidad de la energía*

Cuando se utiliza un analizador de circuitos eléctricos para realizar las mediciones de los parámetros eléctricos con data-logger, se tiene la ventaja de poder analizar de forma directa, la calidad de la energía y con ella detectar posibles anomalías en las instalaciones eléctricas, sistema de tierras o motor eléctrico. Al detectar posibles anomalías se pueden recomendar acciones de mejora que, aunque sea en menor grado, ayudarán sin duda a la mejora de la eficiencia energética del motor eléctrico. En caso de no contar con un analizador de circuitos eléctricos o de la posibilidad de registro de mediciones de los parámetros eléctricos, se puede determinar la calidad de la energía mediante el cálculo de desbalance de tensión, corriente y la diferencia de la tensión suministrada respecto a la nominal del motor.

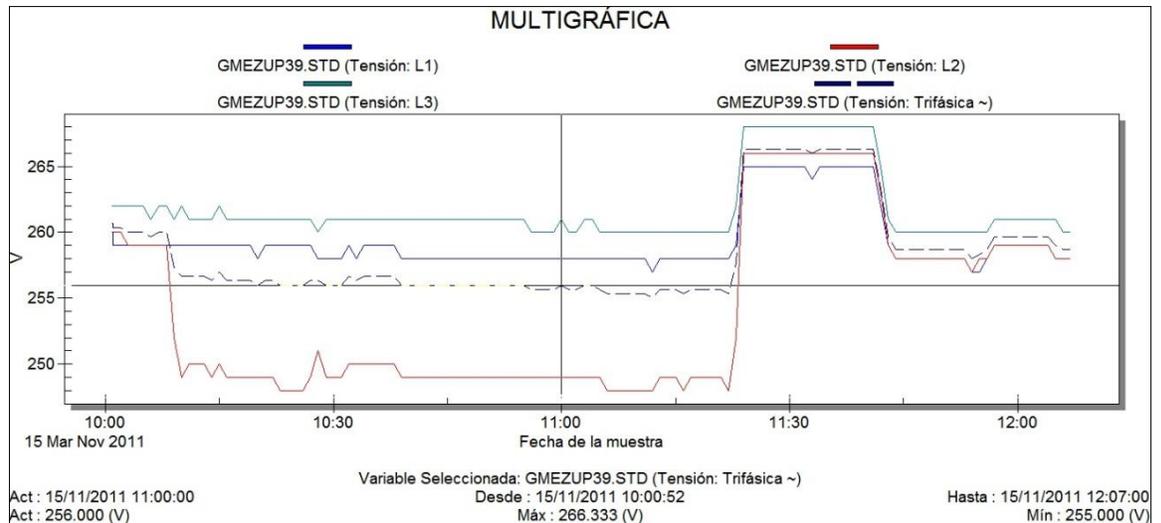
Para poder analizar la calidad de la energía, es importante tener el registro de los parámetros eléctricos en un periodo extendido de tiempo de al menos 30 minutos. Cuando la operación de los equipos es variable a lo largo del día o de la semana, debido a cambios por tandeo o envío a tanques con diferente carga de bombeo, es recomendable que el registro de estos parámetros se realice durante un periodo de tiempo tal que se asegure cubrir todos los cambios de operación.

Las gráficas de comportamiento a analizar y las conclusiones que se pueden deducir sobre su comportamiento se describen a continuación.



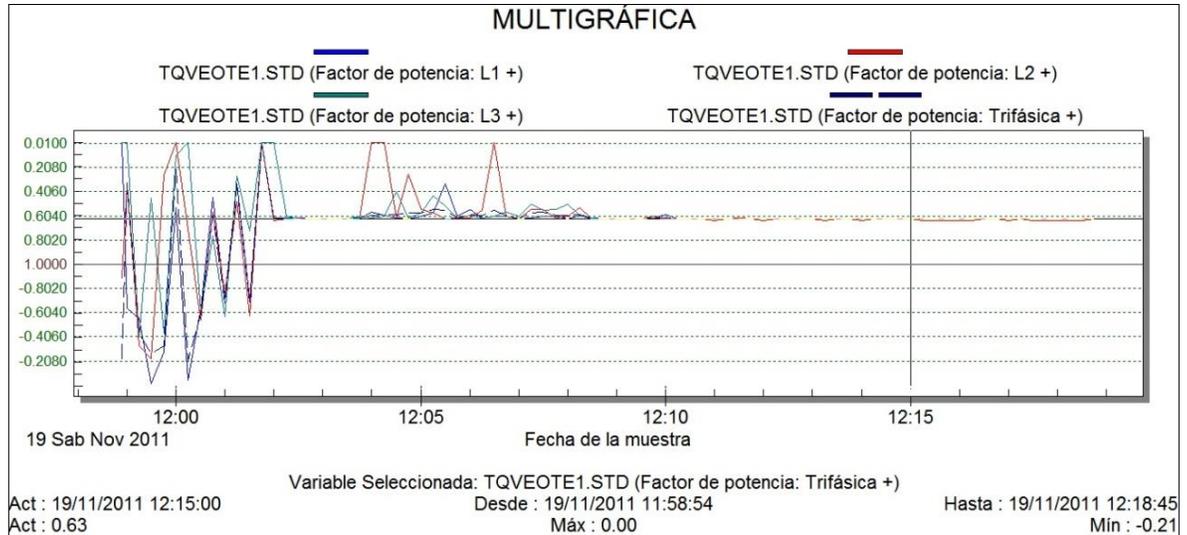
El Gráfico de corriente eléctrica (figura 79), muestra el comportamiento en las tres fases y del promedio, en este caso se observa primero un desbalanceo entre ellas y segundo, en cada fase las variaciones son diferentes aun cuando el promedio presenta muy pequeñas variaciones. Este comportamiento es indicativo que el desbalance puede deberse a un desbalance en la tensión que se observaría en su gráfico, o bien también puede indicar un motor reparado en no muy buenas condiciones, provocando una disminución de la eficiencia del motor.

ILUSTRACIÓN 80
EJEMPLO DE
GRÁFICO DE
COMPORTAMIENTO
DE TENSIÓN
ELÉCTRICA.



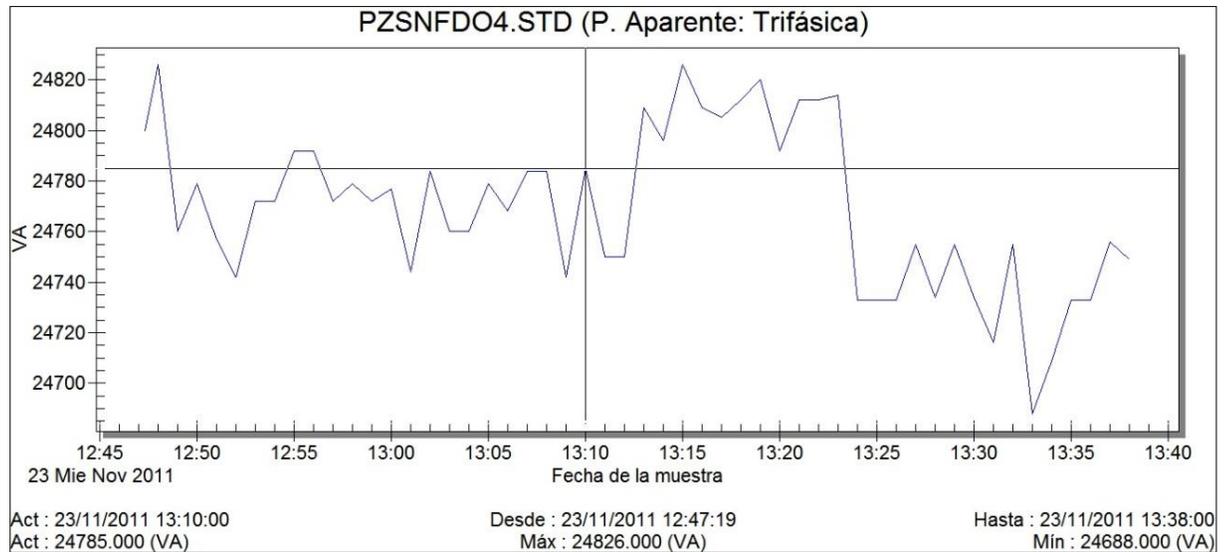
En la figura 80 se observa que el comportamiento de la tensión que en principio muestra el comportamiento de la tensión entregada por el suministrador, sin embargo en condiciones de carga plena presenta las alteraciones provocadas por las caídas de tensión en la alimentación, desde la media tensión, transformador, apriete de conexiones y conductores alimentadores hasta el punto de medición, para el caso del ejemplo se distingue desbalanceo importante entre fases durante la operación con carga y muy pequeña sin carga, además se aprecia que existe una caída importante de 10 V en operación con carga indicativo que probablemente las conexiones se encuentran en mal estado o no están debidamente apretadas.

ILUSTRACIÓN 81
EJEMPLO DE GRÁFICO DE FACTOR DE POTENCIA



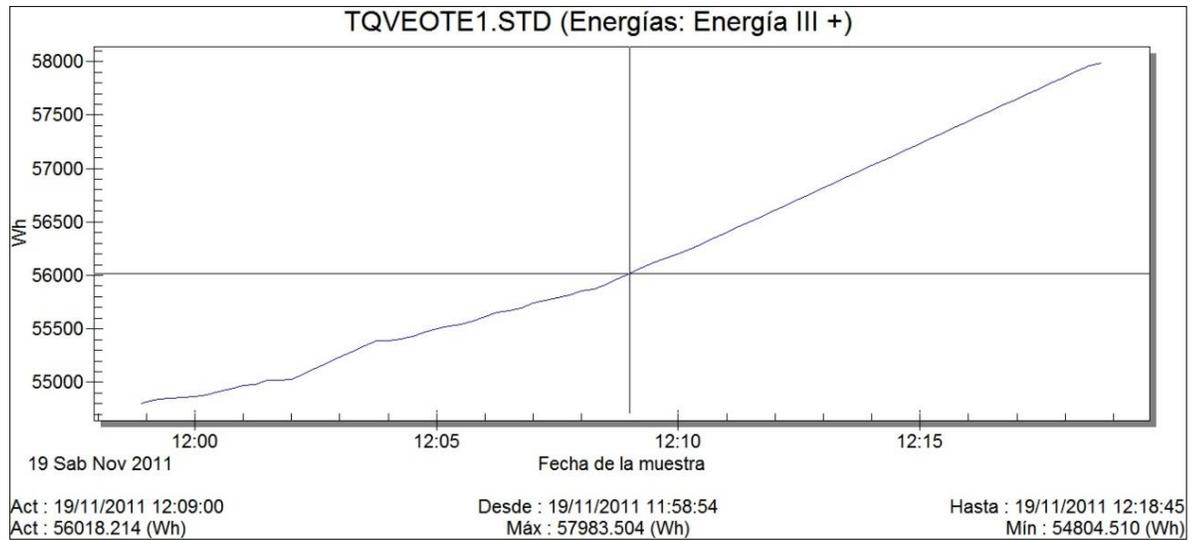
El gráfico de factor de potencia (figura 81), muestra los comportamientos de la corriente y la tensión, principalmente relacionados con el porcentaje de carga del motor, el valor promedio se emplea para calcular la capacidad de los capacitores de corrección, en el caso de usar variador de frecuencia, el factor de potencia debe ser corregido por calibración en el propio variador, esto se observa cuando los transformadores de corriente se colocan en la entrada al variador cuando se realiza la medición de este parámetro.

ILUSTRACIÓN
82 EJEMPLO
DE GRÁFICO
DE
POTENCIA
ACTIVA



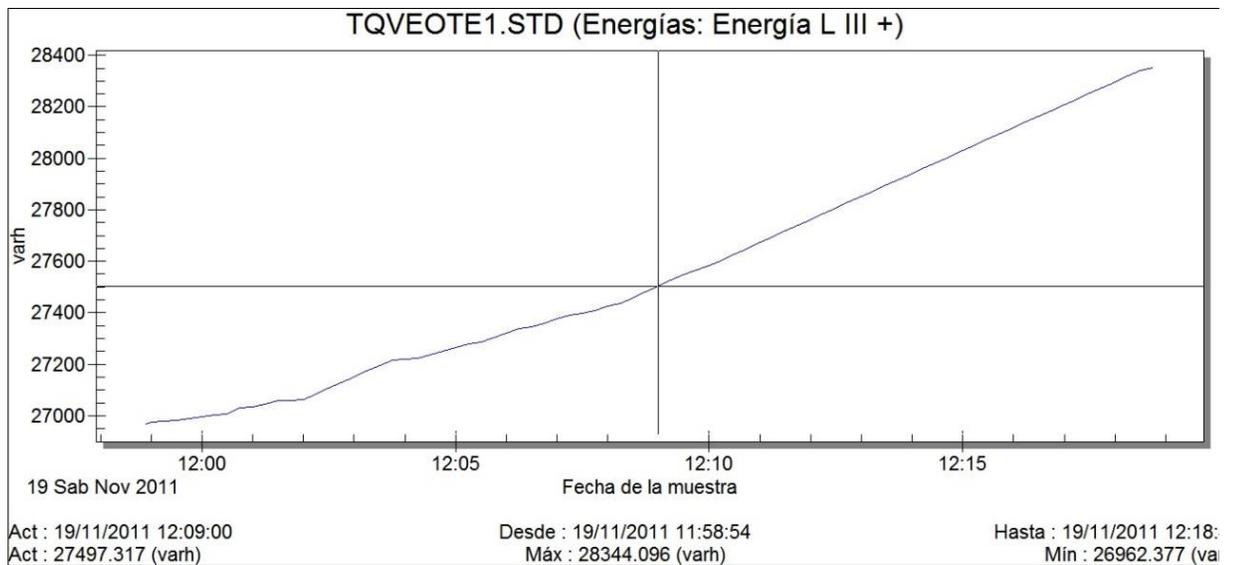
El gráfico de potencia activa (figura 82), es fundamental para el estudio de la eficiencia electromecánica de un equipo de bombeo, en el ejemplo se aprecia una variación durante el tiempo de medición, esto es indicativo de un bombeo directamente a la red cuando se emplea un variador de velocidad para mantener la presión constante, por otra parte si no es el caso de inyectar a red, estas variaciones indicaran que el pozo está boqueando es decir que está bombeando al límite del nivel dinámico.

ILUSTRACIÓN
83 EJEMPLO
DE GRÁFICO
DE ENERGÍA.



La gráfica de energía es la integración del comportamiento de la potencia activa a lo largo de la medición, esta es fundamental para el análisis del equipo de bombeo y obtener el balance de energía más cercano a lo real.

FIGURA 5.12.
EJEMPLO DE
GRÁFICO DE
ENERGÍA
REACTIVA



El gráfico de energía reactiva tiene el mismo propósito que el anterior y nos permite calcular el factor de potencia más aproximado al que mide el suministrador.

- V_{an} = Tensión de la fase A a neutro (volts).
- V_{bn} = Tensión de la fase B a neutro (volts).
- V_{cn} = Tensión de la fase C a neutro (volts).
- V_{prom} = Tensión promedio entre fases.

Valores mayores al 5% de desbalance de tensión entre fases pueden representar problemas con el suministrador, en el caso de que no se tengan estos niveles de desbalance en la corriente, o por otro lado si el motor se encuentra a plena carga, puede ser indicativo de problemas en las conexiones eléctricas.

Desbalance de Corriente ($Desb_I$)

El desbalance de corriente se calcula a partir de las mediciones de corriente por fase, por medio de la siguiente ecuación:

$$Desb_I = \frac{\max\{(\max(I_A, I_B, I_C) - I_{prom}), (I_{prom} - \min(I_A, I_B, I_C))\}}{I_{prom}} * 100$$

ECUACIÓN 62

Donde:

- $Desb_I$ = Desbalance de corriente (%)
- I_A = Corriente de la fase A (Amp)
- I_B = Corriente de la fase B (Amp)
- I_C = Corriente de la fase C (Amp)
- I_{prom} = Corriente promedio de las tres fases (Amp)

El desbalance de corriente con valores mayores al 5% son indicativos de que el motor ha sido reparado o rebobinado, o que ya presenta posibles fallas por sobre calentamiento.

Tensión de Alimentación Diferente al Nominal ($Desb_{VSN}$)

El valor de la tensión de alimentación diferente a la nominal, se calcula en términos porcentuales de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Desb_{VSN} = \frac{(V_{prom} - V_{placa})}{V_{placa}} * 100$$

ECUACIÓN 63

Donde:

- $Desb_{VSN}$ = Diferencia porcentual entre el valor del voltaje de alimentación y el dato de placa del voltaje nominal (%).
- V_{prom} = Tensión promedio entre fases (volts).
- V_{placa} = Tensión nominal de alimentación, indicado en la placa (volts).

La diferencia de tensión suministrada contra la tensión nominal del motor, es un factor importante que afecta directamente la eficiencia de los motores, para corregir esta diferencia se puede ajustar los TAP's del transformador para tratar de aumentar o disminuir (según sea el caso), la tensión entregada del lado de media tensión y al motor.

10.1.3.4 Análisis del Factor de Potencia

La influencia que tiene un factor de potencia bajo sobre el valor de la corriente demandada en el sistema, ocasiona pérdidas de energía, entre las que destacan las siguientes:

- a) Aumento de las pérdidas por efecto Joule ($R I^2$); estas pérdidas se manifestarán en:
 - Los conductores entre la acometida y el (los) motor (es).
 - Los embobinados de los transformadores de distribución.
 - Los dispositivos de operación y protección.
- b) Aumento en la caída de voltaje en los cables alimentadores, que puede resultar en un voltaje de entrada a los motores menor y con ello pérdidas de eficiencia en los mismos.
- c) Incremento de la potencia aparente, con lo que se reduce la capacidad de carga instalada. Esto es importante en el caso de los transformadores de distribución.

Estas pérdidas afectan al productor y distribuidor de energía eléctrica, por esta razón se penaliza al usuario haciendo que pague más por su consumo de energía eléctrica. El valor establecido de penalización y bonificación es del 0.9 (90%). Debajo de ese valor se paga una penalización que se calcula con la ecuación 64:

$$\% \text{ Recargos} = \frac{3}{5} \left[\left(\frac{90}{FP} \right) - 1 \right] * 100$$

ECUACIÓN 64

Donde: FP es el factor de potencia existente en la instalación.

Por encima del 0.9 (90%), la bonificación a conseguir se calcula con la ecuación 65.

$$\% \text{ Bonificación} = \frac{1}{4} \left[1 - \left(\frac{90}{FP} \right) \right] * 100$$

ECUACIÓN 65

La tarea durante el DEE respecto al análisis del factor de potencia FP, consistirá en medir el FP real de todos los equipos diagnosticados. En caso de que el instrumento de medición no registre directamente el valor de FP trifásico, se deberá calcular con base en los valores de potencia activa y potencia reactiva obtenidos durante las mediciones. La manera de calcularse, es aplicando la ecuación 66.

$$FP = \frac{P_{act}}{\sqrt{(P_{act}^2 + P_r^2)}}$$

ECUACIÓN 66

Donde:

- FP = Factor de potencia.
- P_{act} = Potencia activa medida (kW).
- P_r = Potencia reactiva medida (kVar).

El factor de potencia en los motores de inducción depende de su capacidad (HP), y del factor de carga (FC) al cual esté trabajando. En la figura E.4 del **Anexo E**, se muestran los valores esperados del Factor de Potencia a plena carga, como función de la capacidad nominal del motor, y en la figura E.5 del mismo Anexo se muestra como varía el factor de potencia de un motor, como función del factor de carga al cual se encuentre trabajando. De esta última figura se desprende que una de las causas del bajo factor de potencia, es originada por motores trabajando con un bajo factor de carga; estos se consideran motores sobredimensionados.

Luego entonces, durante el DEE se determinará si el factor de potencia del motor está por debajo del que le correspondería dado el número de polos, su capacidad nominal y el factor de carga al cual está trabajando. De ser así esto será un indicativo de que el motor se encuentra en mal estado, por lo que aplicaría un mantenimiento al motor, o la sustitución del mismo por un motor nuevo de alta eficiencia.

10.1.3.5 Evaluación de conductores eléctricos

En los conductores eléctricos se presentan pérdidas de energía eléctrica por el efecto Joule, las cuales son función de la resistencia del conductor y el cuadrado de la corriente eléctrica que circula por él. Matemáticamente las pérdidas de energía en los conductores se expresan mediante la ecuación 67.

$$P_{joule} = R_c * I_c^2$$

ECUACIÓN 67

Donde:

- P_{joule} = Pérdidas por efecto Joule (Watts).
- R_c = Resistencia total del conductor, Ohms (Ω).
- I_c = Corriente circulando en el conductor (Amperes).

La resistencia del conductor (R_c) es una propiedad definida del mismo y depende del calibre, tipo, material y temperatura de trabajo²⁸, en la tabla 55 siguiente se muestra a manera de ejemplo la resistencia a la corriente continua para conductores de cobre sin estañar con una temperatura de trabajo a 75 °C y para los calibres más comunes de uso en instalaciones de bombeo.

Tamaño o designación		Resistencia a la c.c. a 75 °C
		Cobre
mm ²	AWG kcmil	Ω/km
3.31	12	6.5000
5.26	10	4.0700
8.37	8	2.5500
13.3	6	1.6100
21.2	4	1.0100
26.7	3	0.8040
33.6	2	0.6360
42.4	1	0.5050
53.5	1/0	0.4000
67.4	2/0	0.3170
85.0	3/0	0.2520
107	4/0	0.1990
127	250	0.1690
152	300	0.1410
177	350	0.1200
203	400	0.1050
253	500	0.0846

TABLA 55 RESISTENCIA A LA CORRIENTE CONTINUA PARA DIFERENTES CALIBRES DE CONDUCTOR DE COBRE SIN ESTAÑAR A 75°C²⁹

Para obtener la resistencia total de los conductores (R_c) y aplicar en la ecuación 67 se debe buscar la resistencia por km del conductor de acuerdo a la tabla 55 y multiplicarla por la longitud de conductor y el número de fases, ya que la corriente indicada en la ecuación se refiere a la corriente trifásica total.

²⁸ La NOM-001-SEDE-2005 "instalaciones eléctricas", Actualizada en Mayo de 2013 como NOM-001-SEDE-2012 (utilización) presenta en la TABLA 10-8 las propiedades de los conductores eléctricos donde muestra para cada tipo y calibre de conductor la Resistencia a la corriente continua de dichos conductores en Ω/km

²⁹ Según TABLA 10-8 de la NOM-001-SEDE-2005, Actualizada en Mayo de 2013 como NOM-001-SEDE-2012

La resistencia al paso de la corriente por el conductor también genera una caída de voltaje (ΔV_j) que se calcula en función de la corriente mediante la ecuación 68.

$$\Delta V_j = R_c * I_c$$

ECUACIÓN 68

La evaluación energética como parte del Diagnóstico de Eficiencia Energética consiste en calcular las pérdidas en el conductor cuyo método se ilustra en el siguiente ejemplo:

Ejemplo: Calcular las pérdidas en un conductor eléctrico de cobre sin estañar que alimenta un motor de 90 A conectado a un equipo de bombeo sumergible. El calibre del conductor instalado es de 1/0 con 3 fases 4 hilos a 440 V. La longitud del conductor es de 130 m. La operación del equipo es de 6,000 horas/año a un costo energético de 1.6 \$/kWh.

Paso 1.- Se calcula la resistencia total del conductor.

De acuerdo a la tabla 55, para calibre 1/0 la resistencia del conductor es de 0.4000 Ω /km. Entonces la resistencia del conductor será:

$$R_c = 0.4000 \Omega/km * 0.130 km * 3 Fases = 0.156 \Omega$$

Paso 2.- Se aplica la ecuación 67 para determinar las pérdidas energéticas.

$$P_{joule} = 0.156 \Omega * 90^2 = 1,264 W = 1.264 kW$$

Paso 3.- Se calcula la pérdida total anualizada y el costo anual de la pérdida, multiplicando por las horas de trabajo y el costo energético, respectivamente

$$Perdida\ anual\ en\ conductores = 1.264 kW * 6,000 h/año = 7,581 kWh/año$$

$$Costo\ anual\ de\ la\ perdida\ en\ conductores = 7,581 kWh/año * 1.6 \$/km = 12,13.60 \$/año$$

Paso 4.- Se calcula la caída de tensión y el porcentaje respecto al nominal, provocada en los conductores aplicando la fórmula 68 de la manera siguiente:

$$\Delta V = 0.156 \Omega * 90 = 14.04 V$$

$$\% \Delta V = \frac{14.04}{440} * 400 = 12.73\%$$

Tensión (V) =	440	V
Corriente (I) =	90	A
Resistencia del conductor (R_c) =	0.156	Ω
Caída de Tensión (DV = R_c * I_c) =	14.04	V
	3.19	%
Pérdidas (P_j = I² x R) =	1,264	W
	1.26	kW
Pérdidas de Energía =	19,800	kWh/año
	27,720.00	\$/año

TABLA 56 RESUMEN DEL RESULTADO DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN CONDUCTORES DE ACUERDO AL EJEMPLO.

10.1.4 Diagnóstico energético de motores eléctricos

Del universo de motores eléctricos, es sin duda, el motor de inducción el más popular de todos, debido a su gran versatilidad y bajo costo. Es por lo tanto el de mayor aplicación en los sistemas de agua.

El primer paso para el diagnóstico energético del motor consiste en investigar las características generales del equipo a través de la recopilación de la información de la tabla 57:

1) Datos nominales, también conocidos como “datos de placa” del motor	2) Operación	3) Historial
a) Marca y Tipo de motor b) Potencia (HP _{nominal}) c) Voltaje de Alimentación (Volts) d) Corriente a plena carga (Amperes), Factor de servicio e) Velocidad de rotación a plena carga (RPM), f) Eficiencia nominal	a) Horas de operación del motor (h/ día y anuales) b) Horas de operación en horario punta, base e intermedia	a) Antigüedad b) Número de rebobinados y características c) Ocurrencia de fallas

TABLA 57 DATOS A RECOPIRAR DE UN MOTOR ELÉCTRICO PARA EL DIAGNÓSTICO DE EFICIENCIA

Las principales recomendaciones para conseguir información confiable son las siguientes:

- Verificación en campo.**- Aunque una fuente inicial de esta información son los archivos existentes en las áreas de mantenimiento del organismo, es muy común que no se cuente con ello. Aun teniéndolo, puede ser que no coincida con los reales debido a los continuos cambios físicos de equipos. Por ende, es importante verificar con el levantamiento físico de campo, los datos existentes en el momento de la evaluación para obtener conclusiones adecuadas.
- Revisión de bitácoras de operación.**- Normalmente las llevan los operadores de los equipos.
- Revisión de estadísticas.**- Aquellas con la que cuente el organismo operador.

- d) **“Cruce” de información.**- Por ejemplo, con la estadística de facturación eléctrica se verifican las horas efectivamente trabajadas de los equipos.
- e) **Investigación con los operadores y el personal de mantenimiento.**- Analizar los datos que normalmente no se registran por falta de bitácoras de mantenimiento como la última reparación de los equipos, la antigüedad, etc.

10.1.4.1 Evaluación de eficiencia de motores

La eficiencia de un motor eléctrico es la medida de su habilidad para convertir la potencia eléctrica que toma de la línea, en potencia mecánica útil. Se expresa usualmente en por ciento de la relación de potencia mecánica entre la potencia eléctrica.

$$Eficiencia_{motor} = \frac{Potencia_{mecánica}}{Potencia_{eléctrica}} * 100$$

ECUACIÓN 69

Para evaluar la eficiencia del motor existen varios métodos. En el caso de motores nuevos cuya eficiencia se mide en laboratorio, se utiliza el método indicado por la norma IEEE-112. Para los equipos en operación se tienen dos métodos prácticos que son los siguientes:

Método del deslizamiento.- Consiste en comparar la velocidad de rotación real con la de diseño. Esta metodología ha sido explicada en el capítulo 7.2.3.7 del presente manual.

Método de la eficiencia ajustada o de la curva de eficiencia.- Este es un procedimiento iterativo basado en la comparación de la eficiencia calculada contra la reportada por las curvas características de eficiencia y en función del factor de carga para el motor en estudio. Este procedimiento resulta más viable de aplicar y proporciona resultados aceptables para fines de diagnóstico energético. Este método implica la medición de los siguientes parámetros eléctricos:

- a) Tensión eléctrica de entrada (Voltaje) entre fases: V_{AB} , V_{BC} , V_{CA} y valor trifásico.
- b) Corriente por fase: I_a , I_b , I_c , y valor promedio trifásico: I_{pt} (Amperes).
- c) Potencia activa por fase: P_a , P_b , P_c , y valor trifásico: P_t (kW).
- d) Potencia reactiva por fase: P_{ra} , P_{rb} , P_{rc} , y valor trifásico: P_{rt} (kVAR).
- e) Factor de potencia por fase: FP_a , FP_b , FP_c , y valor trifásico: FP (%).

Para las mediciones anteriores deben seguirse los procedimientos y recomendaciones indicados en el capítulo 7.2.2.1 de este manual.

Los pasos a seguir para el cálculo de eficiencia del motor con el método de eficiencia ajustada son los siguientes:

Paso 1. A partir de las características nominales del motor ($HP_{nominal}$, RPM y V), especificadas en la tabla 57, se identifica la curva de eficiencia del motor; en la Figura E.11 del **Anexo E** del manual se presenta esta curva para diferentes capacidades nominales de motores.

Paso 2. A partir de la potencia eléctrica demandada por el motor (medición efectuada), se calcula el factor de carga nominal mediante la ecuación 5.2.

$$FC = \frac{\frac{P_e}{\eta_m}}{HP_{nominal} * 0.746}$$

ECUACIÓN 70

Donde:

FC = Factor de carga de operación del motor (adimensional).

P_e = Potencia eléctrica demandada por el motor (dato obtenido en mediciones de campo) (kw).

η_m = Eficiencia de operación del motor (%).

CP_{nominal} = Potencia nominal del motor (la real verificada en campo) (kw).

Paso 3. Comprobar en la curva del motor, que la eficiencia utilizada en el Paso 1, corresponda al factor de carga calculado. En caso contrario, se repite el paso anterior, utilizando la eficiencia que corresponda al FC calculado hasta que ambos valores coincidan, poniendo fin al proceso iterativo. Los últimos valores de eficiencia del motor y factor de carga son los resultados reales del motor en estudio.

Paso 4. Una vez determinada la eficiencia del motor y factor de carga nominales, se debe calcular los tres indicadores de calidad de energía referentes al desbalance de tensión (D_{BV}), desbalance de corriente (D_{BI}) y el porcentaje de tensión diferente al nominal (D_{VSN}) de acuerdo a lo descrito en el capítulo 10.1.3.2.; con estos datos y los datos de mantenimiento y antigüedad, la eficiencia del motor se deprecia de acuerdo a los siguientes criterios:

- a) Si el motor tiene más de 10 años de antigüedad, depreciar un punto porcentual.
- b) Si el motor ha sido rebobinado, depreciar dos puntos porcentuales; cuando se conoce la temperatura a la que se expuso el motor durante el proceso de rebobinado, le eficiencia se deprecia de acuerdo a la tabla 58.

Temperatura utilizada °C	Puntos de reducción de la eficiencia del motor
633	0.0053
683	0.0117
733 (soplete)	0.0250
Químico	0.0040

TABLA 58 DEPRECIACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN MOTOR REBOBINADO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA UTILIZADA

- c) Si la tensión de alimentación es diferente al de placa ($Desb_{VSN}$), de acuerdo al cálculo realizado en el capítulo 10.1.3.2, se debe aplicar el ajuste a la eficiencia indicado en la curva mostrada en la figura incluida en la figura E.2 del **Anexo E**. Entrando a esta gráfica con el porcentaje de
- d) Si el voltaje de alimentación medido presenta un desbalance, aplicar el ajuste a la eficiencia indicado en la curva mostrada en la figura E.3 del **Anexo E**.

10.1.4.2 Análisis de resultados de la eficiencia de motor

El análisis de resultados tiene como objetivo el detectar condiciones de operación ineficientes que estén ocasionando consumos de energía en exceso. En la tabla 59, se presenta una relación de las principales condiciones de operación ineficientes que suelen presentarse con los motores eléctricos, así como el diagnóstico del origen de dicha condición.

Condición observada	Diagnóstico
Voltaje de alimentación por debajo del nominal	El voltaje en el punto de acometida está por debajo del nominal.
	El voltaje en el punto de acometida presenta variaciones mayores al 5%.
	El voltaje en el punto de acometida es el nominal y no presenta variaciones significativas.
Desbalance del voltaje de alimentación al motor	El voltaje en el punto de acometida está desbalanceado.
	El voltaje en la acometida está balanceado y en el secundario del transformador desbalanceado.
	El voltaje en los bornes del secundario del transformador está balanceado y en la alimentación al motor se encuentra desbalanceado.
Desbalance en la corriente demandada por el motor.	El desbalance en corriente es inversamente proporcional al desbalance en voltaje.
	El desbalance es producido por una demanda desbalanceada por las fases del motor.
La velocidad de operación del motor está por debajo de la velocidad a plena carga.	Problemas con rodamientos y/o cojinetes
Alta temperatura y/o alta vibración en cojinetes y/o rodamientos.	
El motor es de eficiencia estándar y tiene más de 10 años de operación.	La eficiencia de operación del motor es baja.
El motor ha sido reparado (rebobinado), más de dos veces.	La eficiencia del motor se encuentra depreciada.
El motor se encuentra trabajando con un factor de carga menor al 45%.	El motor se encuentra trabajando en una zona donde su eficiencia de operación es baja.

Condición observada	Diagnóstico
El motor se encuentra trabajando con un factor de carga mayor al 100%.	El motor se encuentra trabajando en una zona donde su eficiencia de operación es baja.

TABLA 59 CONDICIONES DE OPERACIÓN INEFICIENTE DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

10.1.5 Diagnóstico energético de la bomba.

Es importante diagnosticar varios aspectos que pueden ser causa de excesivo consumo energético en el equipo de bombeo, pero que al mismo tiempo representan oportunidades para ahorrar energía de manera sustancial.

Los principales aspectos a diagnosticar son:

- a) Eficiencia actual del equipo de bombeo
- b) Condiciones de operación del sistema
- c) Características de las instalaciones y pérdidas energéticas en el sistema de conducción

10.1.5.1 Pérdidas típicas en bombas

Las bombas sufren pérdidas de energía como resultado de los mecanismos hidráulicos que suceden en el interior y exterior de sus componentes, por ello es lógico que no se pueda alcanzar una eficiencia del 100 %. Para entender el origen de las pérdidas en la operación de bombeo, que finalmente repercuten en el consumo energético, es importante repasar los diferentes tipos de pérdidas que se presentan en las bombas y que se clasifican de la siguiente forma:

a) Pérdidas Internas

- Pérdidas de Carga: Resultan de la viscosidad y la turbulencia del agua. Ejemplo de pérdidas de carga son las pérdidas por choques en la entrada del difusor.
- Pérdidas por Fugas: En una bomba, las pérdidas por fugas internas tienen como causa el juego que necesariamente ha de existir entre partes móviles como el impulsor y partes fijas.
- Pérdidas por Rozamiento Interno: En una bomba centrífuga el impulsor tiene superficies inactivas desde el punto de vista de su función de comunicar energía al fluido. Estas superficies están sin embargo bañadas por el fluido más o menos en reposo, lo cual da lugar a frotamiento producto de la viscosidad del fluido, lo que genera pérdidas internas por rozamiento en el fluido.

b) Pérdidas Externas

- Fugas Externas: Éstas se producen en los lugares donde el eje atraviesa la carcasa de la máquina. Una parte del caudal que entra a la bomba se deriva antes de entrar al impulsor y se pierde.
- Pérdidas por Rozamiento Externo:
 - Rozamiento mecánico en las empaquetaduras que existen en los ejes.
 - Rozamiento mecánico en los cojinetes de la bomba.

Para diagnosticar los equipos de bombeo, el primer paso para el diagnóstico consiste en investigar las características generales del equipo a través del recopilar la información siguiente:

- a) Datos nominales o de diseño
 - Marca.

- Tipo de bomba.
- Caudal (L/s).
- Carga hidráulica total (m).
- Tipo y tamaño de impulsor.
- Número de etapas o pasos.
- Materiales de construcción.
- Curva de operación.
- Eficiencia nominal.
- Velocidad de operación (RPM).

b) Diagramas de operación

- Sistemas de pozo profundo.
- Sistemas de rebombeo.

10.1.5.2 Evaluación de eficiencias de la bomba y electromecánica

La eficiencia global de la bomba en operación (η_b) se calcula como el cociente de la potencia hidráulica de salida (P_h) entre la potencia mecánica absorbida (P_m). La ecuación 5.11 muestra la manera de calcular la eficiencia de la bomba.

$$\eta_b = \frac{\text{Potencia hidráulica de salida } (P_h)}{\text{Potencia mecánica absorbida } (P_m)} \times 100$$

ECUACIÓN 71

Donde:

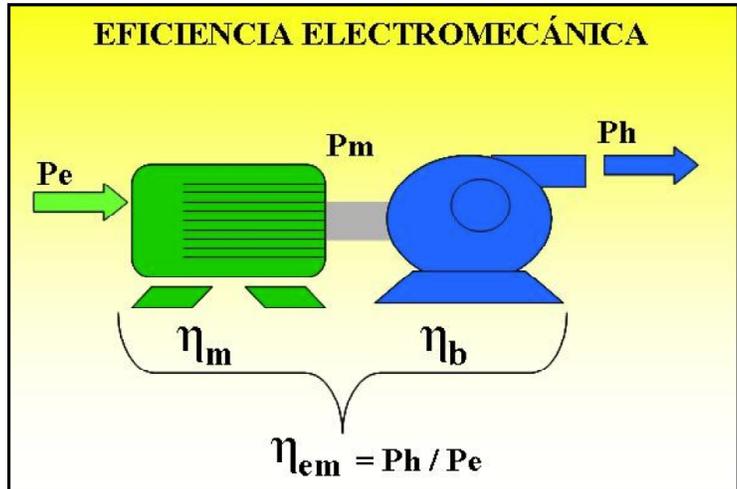
η_b = Eficiencia de la bomba (%)

P_h = Potencia hidráulica de salida de la bomba (kW)

P_m = Potencia mecánica absorbida por la bomba (kW)

Debido a la dificultad de medir la potencia mecánica por separado y de ahí medir la eficiencia de la bomba, se recomienda evaluar la eficiencia electromecánica del conjunto bomba-motor como se observa esquemáticamente en la figura 85.

ILUSTRACIÓN 85 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LAS EFICIENCIAS QUE INTEGRAN LA EFICIENCIA ELECTROMECAÁNICA



La eficiencia de la bomba y la eficiencia electromecánica se calculan de la forma siguiente:

Paso 1. Se calcula la potencia hidráulica de salida a través de la ecuación 72.

$$P_h = \frac{H_b * Q * \gamma * g}{1000}$$

ECUACIÓN 72

Donde:

P_h = Potencia hidráulica de salida (kW).

H_b = Carga hidráulica de bombeo (m.c.a.).

Q = Caudal que pasa por la tubería, a la descarga de la bomba (m^3/s).

γ = Peso específico del agua (kg/m^3).

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2).

El valor de caudal (Q) es un dato obtenido de las mediciones de campo, los valores γ y g son datos casi constantes en el rango típico de temperaturas de operación y generalmente se toman los valores de 1000 y 9.81, respectivamente.

La carga total de bombeo es una combinación de las distintas cargas parciales que se calculan como se indica en el Anexo E Sección E.2.

Paso 2. Con el valor de la potencia manométrica (P_h) calculada y la potencia eléctrica medida (P_e), se calcula la eficiencia electromecánica final con la ecuación 73.

$$\eta_{em} = \frac{P_h}{P_e}$$

ECUACIÓN 73

Donde:

η_{em} = Eficiencia electromecánica

P_h = Potencia hidráulica de salida (kW)

P_e = Potencia eléctrica medida (kW)

Paso 3. Se calcula la potencia de la bomba, una vez calculada la η_{em} , la eficiencia de la bomba η_m por separado se determina de la manera siguiente:

$$\eta_b = \frac{\eta_{em}}{\eta_m}$$

ECUACIÓN 74

10.1.5.3 *Análisis e interpretación de los valores de eficiencia electromecánica diagnosticada*

Los valores determinados de la eficiencia electromecánica (η_{em}) deben compararse durante el DEE con al menos los valores recomendados por las NOM's de eficiencia energética aplicables a los motores y equipos de bombeo existentes en nuestro país, con el fin de determinar los niveles de ahorro de energía potenciales. Esto servirá como una buena base para considerar la sustitución de equipos durante la integración de la cartera de proyectos de ahorro de energía.

Las NOM's Actualizadas en Mayo de 2013 como NOM-001-SEDE-2012 mexicanas que aplican a los equipos electromecánicos más comunes en los sistemas de agua potable y saneamiento son las siguientes:

- 1) NOM-001-ENER: Eficiencia energética de bombas verticales tipo turbina con motor externo eléctrico vertical.
- 2) NOM-010-ENER: Eficiencia energética de bombas sumergibles.
- 3) NOM-006-ENER: Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación.

Estas NOM's establecen valores mínimos recomendables para las eficiencias de equipos y sistemas como pozos profundos. Las dos primeras aplican a fabricantes y la tercera aplica a los organismos operadores.

A manera de ejemplo, se muestra en la tabla 60, los valores mínimos recomendables para la eficiencia electromecánica de pozos profundos en operación que recomienda la NOM-006-ENER-1995, en función del intervalo de capacidades.

Intervalo de potencias		Eficiencia electromecánica (%)
kW	hp	
5,6 - 14,9	7,5-20	52
15,7 - 37,3	21-50	56
38,0 - 93,3	51-125	60
94,0 - 261	126-350	64

TABLA 60 VALORES MÍNIMOS DE EFICIENCIA ELECTROMECAÁNICA CON BASE EN LA NOM 006 ENER-1995

Esta Norma establece que en cualquier sistema de bombeo para pozo profundo que utilice la energía eléctrica como medio energético para su operación y que, derivado del diagnóstico presente una eficiencia electromecánica menor o igual a la indicada en la tabla 57 5, deberán efectuarse acciones de rehabilitación y/o sustitución de los equipos electromecánicos, con el propósito de elevar la eficiencia.

De acuerdo a lo que establece la Norma, las acciones de rehabilitación y/o sustitución pueden estar dirigidas al motor, bomba, a la estructura del pozo profundo, o a una combinación de éstos; de tal forma que se obtengan valores de eficiencia electromecánica mucho mayores a los establecidos en la tabla 60.

Los ahorros potenciales que es factible lograr pueden estar arriba del 20% de los valores de eficiencia, que establece la NOM 006 para pozos en operación.

10.1.5.4 *Análisis de las condiciones de operación de los equipos de bombeo*

Es muy común encontrar que los sistemas de bombeo operan en condiciones diferentes para las que están diseñados. Entre las causas que originan este problema están las siguientes:

Funcionamiento discontinuo del sistema de agua potable (tandeos): Debido a los cambios de zonas de abastecimiento ocasionados por el tandeo, los equipos de bombeo operan en distintas condiciones de carga hidráulica para diferentes volúmenes de suministro.

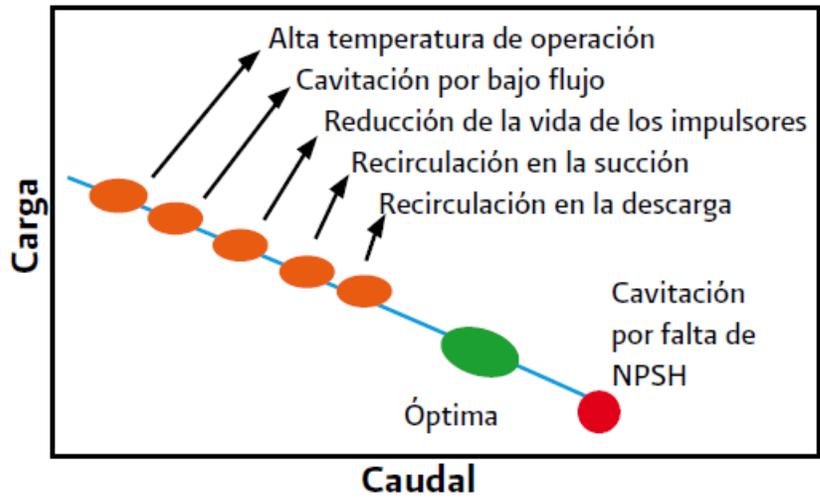
Reparaciones urgentes ocasionadas por la falta de mantenimiento preventivo: Es común atender reparaciones urgentes y carecer de componentes disponibles en inventario para realizar las reparaciones necesarias o la sustitución por los equipos apropiados a cada aplicación, por lo que generalmente se instalan los equipos disponibles, que en la mayoría de los casos están diseñados para otras condiciones de operación de carga y gasto.

De acuerdo con su diseño, todos los equipos de bombeo tienen un punto de operación óptimo Carga hidráulica – Caudal, donde todas las pérdidas descritas anteriormente se minimizan. Fuera de este punto se presentan problemas como los siguientes:

- a) Bajo rendimiento energético.
- b) Reducción del tiempo de vida de sus componentes, particularmente de los impulsores y anillos de desgaste.
- c) Cavitación por bajo flujo en la succión.

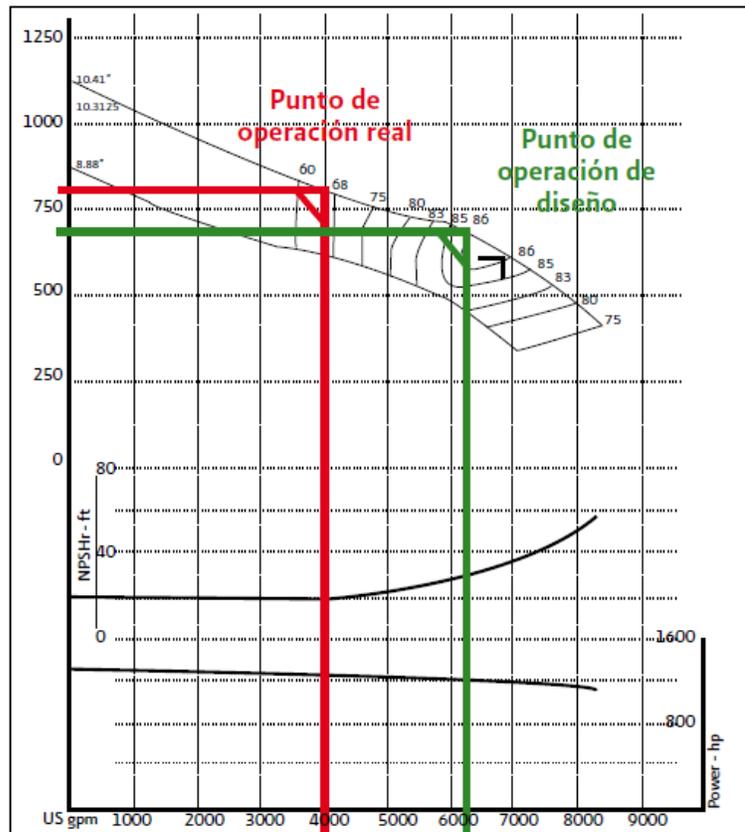
En la gráfica mostrada en la figura 86, se presenta un esquema de los problemas típicos que se presentan al operar un equipo de bombeo fuera de la zona óptima de operación.

ILUSTRACIÓN 86 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LOS PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN AL OPERAR LAS BOMBAS FUERA DE SU PUNTO ÓPTIMO



El efecto en la reducción de la eficiencia del sistema de bombeo se ilustra en la figura 87, donde se puede observar que una variación significativa en las condiciones de operación Carga hidráulica–Caudal, pueden significar variaciones de hasta un 20 % en la eficiencia del equipo.

ILUSTRACIÓN 87 MODIFICACIÓN DE LA EFICIENCIA POR VARIACIÓN DE CONDICIONES DE OPERACIÓN EN UNA BOMBA



Ante esta situación, es muy importante que durante el DEE se realicen las siguientes tareas:

- 1) Identificar claramente el esquema de operación del equipo en estudio. Esto incluye las condiciones de operación de Carga hidráulica– caudal para diferentes periodos del día o semanalmente y la duración de los mismos.
- 2) Obtener los parámetros de diseño o de ser posible la curva original de diseño del equipo que se encuentre instalado para poder dar las recomendaciones pertinentes a cada situación. Los casos típicos de operación de equipos fuera de su diseño original se presentan en la tabla 61.

<i>Tipo de Bomba</i>	<i>Ubicación del punto de operación</i>
Centrífuga vertical	Por encima de la curva de la bomba
	Por debajo de la curva de la bomba
Centrífuga horizontal	Por encima de la curva de la bomba
	Por debajo de la curva de la bomba

TABLA 61 CASOS TÍPICOS DE OPERACIÓN FUERA DE SU DISEÑO ORIGINAL

10.1.6 Diagnóstico energético en el sistema de conducción y distribución de agua.

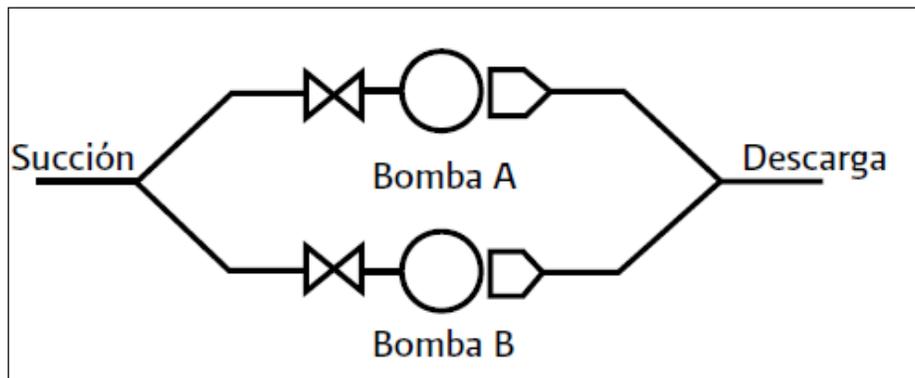
10.1.6.1 Problemas típicos en sistemas de conducción

Un problema importante que afecta la operación de los sistemas de bombeo es la escasa capacidad de los sistemas de conducción. Es muy común encontrar escasa capacidad de los sistemas de conducción en la descarga de los sistemas de bombeo. Esto se refleja en tres problemas típicos que deberán identificarse durante el DEE, para emitir las recomendaciones pertinentes.

Entre los principales problemas a analizar durante el DEE están los siguientes:

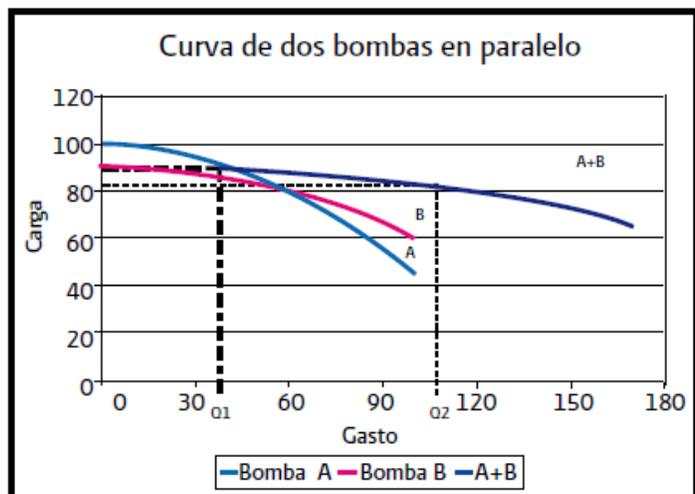
- a) **Excesivas pérdidas energéticas.**- Es muy común encontrar escasa capacidad de los sistemas de conducción en la descarga de los sistemas de bombeo.
- b) **Reducción en la capacidad de conducción en los múltiples de descarga.**- Este problema se presenta frecuentemente en sistemas de rebombeo compuestos por equipos múltiples trabajando en paralelo, donde se ha aumentado el número de equipos pretendiendo entregar más caudal a la red sin revisar la capacidad de la conducción. Esto ocasiona que, los equipos trabajando en conjunto no suministren mayor caudal para el que son capaces de manera individual. Debido al aumento en la carga, y se reduzca significativamente su eficiencia. Este problema se explica técnicamente por la teoría de los sistemas operando en paralelo, como se muestra en la figura 88.

Ilustración 88 Arreglo típico de bombas centrífugas operadas en paralelo



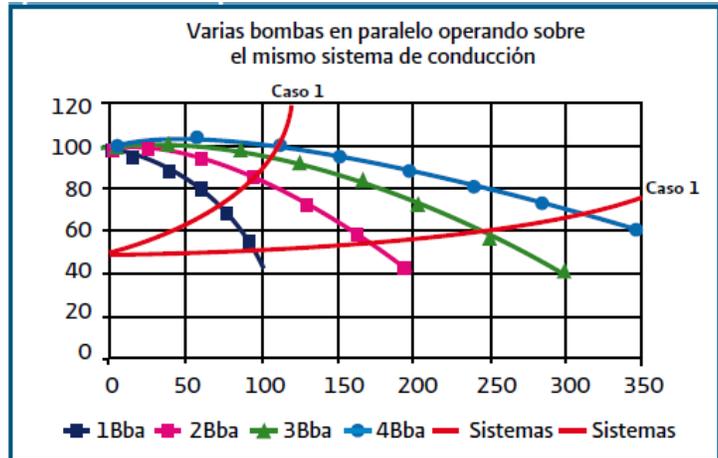
Normalmente la curva de operación del arreglo de equipos conectados en paralelo se obtiene sumando las capacidades de cada bomba para iguales condiciones de carga. El resultado de esto es mostrado en la figura 89.

ILUSTRACIÓN 89 CARACTERÍSTICAS DE CARGA-CAPACIDAD DE BOMBAS CENTRÍFUGAS OPERADAS EN PARALELO



Con frecuencia se piensa que al meter una bomba adicional se incrementará el gasto al doble y si se mete una tercera, al triple, y así sucesivamente. En la realidad esto no ocurre así, ya que al haber más gasto por el mismo sistema de conducción, la carga se incrementa y por ende las pérdidas por cortante en la tubería aumentan. Esta situación hace que la aportación de caudal de cada bomba individualmente se reduzca tal y como se mostró en la figura 88, donde se presenta el comportamiento del conjunto. El efecto del incremento en el caudal y comportamiento de la carga hidráulica en el sistema de conducción con varios equipos en paralelo, se muestra en la figura 90.

Ilustración 90 Efecto de la operación de varias bombas en paralelo con respecto al sistema de conducción.



En el Caso 1, la curva del sistema es bastante plana para las cuatro bombas, por lo que conforme se operan más bombas el gasto se va incrementando.

En el Caso 2, la situación es diferente, ya que la curva del sistema no es tan plana como en el Caso 1 (debido al aumento de pérdidas hidráulicas en la conducción). Nótese que al entrar la cuarta bomba en operación, prácticamente ya no se incrementa el caudal total, sino que se reparte éste entre las cuatro bombas, pero la carga hidráulica se incrementa al doble con respecto al Caso 1.

10.1.6.2 Pérdidas de carga hidráulica en los sistemas de conducción

Es posible que en algunos sistemas de distribución, las pérdidas energéticas por cortante en las tuberías sean significativas. Para evaluar esta posibilidad, durante el DEE se recomienda aplicar el siguiente procedimiento:

Paso 1. Con los datos recopilados durante la campaña de medición e inspección de campo, se determina la velocidad del agua en las tuberías primarias de conducción a la descarga de las instalaciones de bombeo.

Paso 2. En las tuberías de conducción donde se tengan velocidades del agua por encima de los 2.0 m/s, se evalúan las pérdidas energéticas por cortante, para integrarlas posteriormente en la cartera de proyectos de eficiencia energética. Para realizar esta evaluación de pérdidas de carga hidráulica en la conducción, se tienen las siguientes opciones:

- Realizar la evaluación con los métodos de análisis de conducciones basado en la modelación hidráulica, lo cual implica la necesidad de construir dicha herramienta antes de esta evaluación.
- Aplicar el procedimiento simplificado para una evaluación rápida del potencial de ahorro.

Esta última opción es recomendable en las primeras etapas del proyecto al determinar las “medidas de ahorro de rápida implementación”, para no tener que esperar a contar con el modelo de simulación.

Para realizar el análisis por el método convencional, se emplea el siguiente procedimiento:

Paso 1. Calcular las pérdidas primarias por cortante en la tubería instalada.

Paso 2. Calcular las pérdidas por singularidades (accesorios).

Paso 3. Calcular de la potencia eléctrica (P_e) necesaria para compensar las pérdidas de carga por cortante, utilizando la ecuación 75.

$$P_e = \frac{h_f * Q * 9.81}{\eta_{em}}$$

ECUACIÓN 75

Donde:

P_e = Potencia eléctrica necesaria para compensar pérdidas (kW).

h_f = Pérdidas de carga hidráulica por cortante (m).

Q = Caudal (l/s).

η_{em} = Eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba.

Este valor de potencia necesaria para la compensación de pérdidas depende de gran manera de los diámetros de la tubería al incrementar el gasto que se quiere explotar; asimismo, se deben de considerar las posibles cargas adicionales por incremento de longitudes y desniveles topográficos adicionales, lo cual es una base fundamental para el cálculo de esta medida de ahorro dentro del proyecto de eficiencia energética.

10.1.7 Aspectos de mantenimiento de las instalaciones electromecánicas a observar en el DEE

Durante la elaboración del DEE es necesario evaluar si se lleva algún programa de mantenimiento y de qué tipo. Esto supone identificar si se monitorean diversos parámetros que muestren una relación predecible con el ciclo de vida de los equipos. Algunos de estos parámetros son los siguientes:

- a) Vibración de cojinetes.
- b) Temperatura de las conexiones eléctricas.
- c) Resistencia del aislamiento de la bobina de un motor.

El enfoque de la inspección a desarrollar será verificar que los equipos y las instalaciones se encuentren física y funcionalmente en buen estado. Desde el punto de vista del consumo de energía, se trata de que los equipos “mantengan” sus eficiencias originales. El tipo común de problema de mantenimiento detectado es la ocurrencia de fugas en los estoperos de los equipos de bombeo como se muestra en la figura 91.

ILUSTRACIÓN 91
PROBLEMAS TRÓPICOS DE
FALTA DE
MANTENIMIENTO EN
EQUIPOS DE BOMBEO



Este problema que es recurrente y típico de encontrar, reduce de manera significativa el rendimiento porque incrementa las pérdidas hidráulicas internas y externas de la bomba, como se vio en el inciso 10.1.6.1 de este manual.

10.1.8 Elaboración de balances de energía de equipos de bombeo.

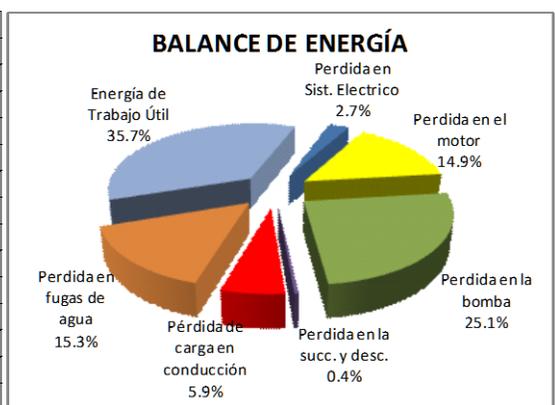
Una vez determinadas las eficiencias energéticas de los componentes del sistema de bombeo, como reporte concluyente de la evaluación de las pérdidas en el sistema de bombeo, se debe determinar el Balance de Energía Actual de equipo estudio.

El valor más significativo que se obtiene de este balance es el desglose de todas las pérdidas energéticas a lo largo de la cadena de suministro y utilización de la energía, distinguiéndola del Trabajo Útil, la cual nos indica la cantidad de energía que realmente es utilizada por el sistema para los fines de bombeo de agua. Todo lo que no sea trabajo útil, se convierte en pérdidas y el balance nos permite distinguir como están distribuidas y cuáles son las más impactantes, lo cual a su vez indicara donde esta e mayor potencial de ahorro energético a aprovechar.

Para realizar este balance se deberán determinar las eficiencias y pérdidas de los distintos elementos del sistema, de acuerdo a lo visto en las secciones 6.4.3 y 6.4.4. Estos resultados se desglosan de acuerdo a los conceptos descritos en el ejemplo mostrado en la figura 92, y obtienen los valores de los consumos de energía en cada elemento del sistema.

ILUSTRACIÓN 92
EJEMPLO DE
BALANCE DE
ENERGÍA Y
DISGREGACIÓN
DE PÉRDIDAS
EN UN
SISTEMA DE
BOMBEO.

Parámetro	Unidades	Cantidad
Energía Total Consumida	kWh/año	118,576
Eficiencia del motor	%	84.71%
Eficiencia de la bomba	%	69.54%
Ef. Electromecánica	%	58.91%
Fugas Estimadas	%	30%
Carga total de la bomba	mca	115.46
Carga Estática	mca	103.52
Perdida en Sist. Eléctrico	kWh/año	3,196
Perdida en el motor	kWh/año	17,646
Perdida en la bomba	kWh/año	29,769
Perdida en la succ. y desc.	kWh/año	467
Pérdida de carga en conducción	kWh/año	7,028
Perdida en fugas de agua	kWh/año	18,141
Energía de Trabajo Útil	kWh/año	42,330



A continuación se describen los elementos que componen el balance de energía.

Consumo total.- Es la energía total consumida por el sistema eléctrico en un año de operación calculada como la suma del promedio de la potencia activa en todas las fases, más las pérdidas de

energía en los conductores del tramo transformador al interruptor principal, multiplicada por el tiempo de operación. De esta forma se obtiene el consumo total de energía en kWh.

Eficiencia del motor.- Es la eficiencia real del motor calculada en el capítulo 10.1.4.

Eficiencia de la bomba.- Es la eficiencia de la bomba calculada en el capítulo 10.1.5.

Pérdidas por fugas.- Es la estimación de pérdidas por fugas en la red de distribución de acuerdo a estudios previos o al diagnóstico de eficiencia física de acuerdo a el capítulo 8 del presente manual.

Carga total de la Bomba.- Es la carga total de trabajo calculada en las condiciones de operación y de acuerdo a las mediciones de los parámetros hidráulicos en campo (ver el capítulo 7.2.2.6 tabla 35).

Carga Estática.- Es la carga que debe tener la bomba, debido el desnivel físico por cuestiones topográficas del sistema, más la profundidad que existe entre la succión y el cabezal de la bomba, y se expresa en metros de columna de agua m.c.a.

Pérdidas Eléctricas.- Son las pérdidas de energía debidas a los elementos eléctricos, en este caso, las debidas a las pérdidas de energía en los conductores calculadas en 10.1.3.

Pérdidas en el motor.- Son las pérdidas de energía que se tienen en el motor, debido a la eficiencia real de trabajo del mismo.

Pérdidas en la bomba.- Son las pérdidas de energía que se tienen en la bomba debidas a la eficiencia de trabajo de la misma.

Pérdidas en succión y descarga.- Son las pérdidas de energía provocadas por la fricción del fluido en las tuberías de succión y descarga calculadas en 10.1.6.

Pérdidas de carga.- Son las pérdidas totales de carga de la bomba calculadas en relación de la carga total de la bomba y la carga estática correspondiente (desnivel).

Pérdidas por fugas.- Son las pérdidas de energía estimadas a partir del fluido perdido en fugas en la red de distribución, calculadas en función del factor de fugas.

Trabajo útil.- Es el trabajo real expresado en unidades de energía que requiere realmente el sistema de bombeo. Es decir, la energía que realmente es utilizada para que el sistema de bombeo cumpla con el trabajo encomendado.

Una vez calculados las pérdidas de cada uno de los elementos que componen al sistema de bombeo se puede hacer una gráfica de pastel, como la mostrada en la figura anterior, para una mejor percepción del porcentaje de pérdidas en cada elemento del Balance Energético.

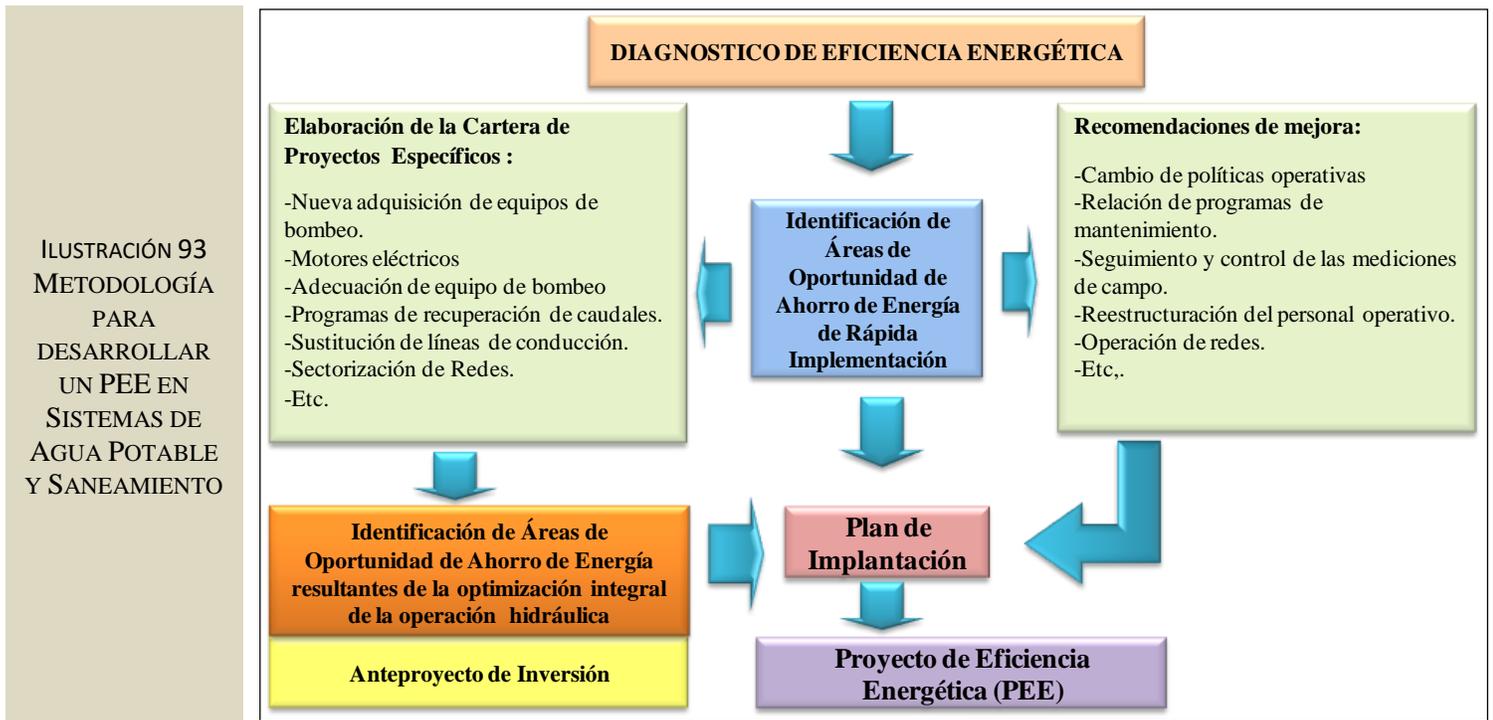
10.2 Proyecto de eficiencia energética

El proyecto de eficiencia energética (PEE) consiste en desarrollar la cartera de proyectos y recomendaciones a implementar en el sistema de agua potable, con oportunidades posibles de ahorro de energía eléctrica, tanto en consumo como en aquellas que solamente reduzcan el costo de la facturación energética. El PEE está basado en el análisis de la información obtenida durante el DEE, incluyendo los análisis de eficiencias en condiciones operativas y de mantenimiento, con su respectivo análisis beneficio-costos.

10.2.1 Metodología para elaborar el Proyecto de Eficiencia Energética (PEE) y determinación de medidas de ahorro

Para ejecutar el PEE se propone seguir una secuencia ordenada, empezando por las acciones que tengan mayor impacto en el consumo energético y posteriormente con aquellas medidas que mejoren la gestión energética,

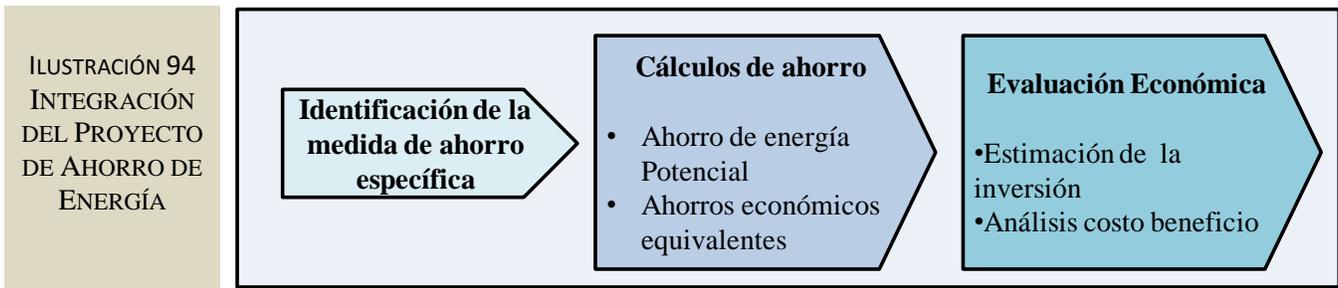
reduzcan los costos y mejoren la administración de la energía. La metodología general propuesta se describe en la figura 93.



En general, las acciones están orientadas a controlar y optimizar las variables que afectan el consumo y costo energético. Algunas de ellas se indican a continuación:

- 1) El caudal que se requiere suministrar.
- 2) La carga que soportan las líneas de conducción en el bombeo (Esta variable depende de factores físicos y topográficos, pero es susceptible de modificar u optimizar a través de técnicas como la sectorización y la modelación hidráulica.).
- 3) La eficiencia de los equipos con la que operan.
- 4) Los tiempos de operación de los equipos de bombeo.
- 5) El comportamiento de parámetros electromecánicos de las instalaciones.

Los pasos a seguir para la integración de los proyectos específicos de ahorro de energía se describen en la figura 94.



Para fines de este manual, las medidas de ahorro se han dividido en 3 tipos:

1) Medidas que reducen directamente el consumo de energía

Éstas influyen directamente en el índice de consumo específico de energía eléctrica (IE, expresado en kWh/m³ producido), y están relacionadas con la disminución de las pérdidas de energía en los diferentes procesos de transformación y conducción de la energía en los sistemas eléctrico, motriz y de distribución hidráulica.

2) Medidas que reducen el costo energético

Éstas únicamente influyen en el costo específico de la energía (CUE, expresado \$/kWh), y están enfocadas en sacar el máximo provecho de la estructura tarifaria, para obtener la tarifa que redunde en un menor costo específico de la energía.

3) Medidas que derivan de la optimización de la operación hidráulica

Éstas incluyen tanto medidas de reducción del consumo como del costo energético y resultan de los proyectos de eficiencia física e hidráulica.

Los índices IE y CUE están descritos de manera más detallada en el capítulo 10 de este manual.

En el presente capítulo se describen las metodologías para la identificación y cálculo de ahorros de las medidas para reducir el consumo de energía y el costo energético (tipo 1 y 2), y en el capítulo 9 “Proyecto de eficiencia integral” se describen a detalle las medidas de ahorro energético derivadas de la optimización de la operación hidráulicas.

En la tabla 62 se listan por sistema las principales medidas genéricas y específicas de ahorro de energía que se deben evaluar como parte del proyecto de eficiencia energética. Asimismo, se incluye una clasificación de acuerdo al nivel típico de inversión asociada. Los métodos de evaluación y sus respectivas bases teóricas así como los criterios a aplicar se describen a continuación, siguiendo el orden y la lógica descritos en la figura 94 y tabla 62.

5.2.2 MEDIDAS QUE REDUCEN EL CONSUMO ENERGÉTICO			
Sistema	Medida genérica	Medida específica	
Sistema motor-	5.2.2.1 Optimización de la eficiencia	Baja Inversión	Adecuación del equipo de bombeo a los puntos de operación reales

bomba	electromecánica		Ajuste de la posición de los impulsores en bombas de turbina con impulsor abierto
		Media Inversión	Sustitución del motor Sustitución del conjunto motor – bomba
	5.2.2.2 Mantenimiento preventivo y predictivo	Baja Inversión	Monitoreo periódico de parámetros relacionados con la eficiencia electromecánica
			Monitoreo de parámetros mecánicos como vibración, temperaturas, etc.
Sistema de distribución hidráulica	5.2.2.3 Optimización de cargas de bombeo	Baja Inversión	Corrección de defectos en la configuración de tuberías de descarga y en la operación
		Alta Inversión	Reducción de pérdidas por cortante en conducciones
	5.2.2.4 Control de presiones y caudales	Media Inversión	Instalación de variadores de frecuencia
		Alta Inversión	Instalación de tanques de regulación
Sistema eléctrico	5.2.2.5 Optimización de las instalaciones eléctricas	Baja Inversión	Optimización del factor de potencia
			Corrección de los desbalances de voltaje
			Corrección del voltaje de suministro al motor, para que sea igual al valor nominal o de placa
		Media Inversión	Reducción de pérdidas eléctricas por efecto Joule Reducción de pérdidas en transformadores
5.2.3. MEDIDAS QUE REDUCEN EL COSTO ENERGÉTICO			
5.2.3.1 Medidas administrativas de reducción de costo energético	Baja Inversión	Selección de tarifa eléctrica, por la que resulte más económica de entre las opciones en media tensión	
		Control manual de la demanda en hora punta	
5.2.3.2 Medidas de inversión	Media Inversión	Control automático de la demanda	
	Alta Inversión	Cambio de la tarifa eléctrica en media tensión por una tarifa en alta tensión	

TABLA 62 PRINCIPALES MEDIDAS DE AHORRO DE ENERGÍA A EVALUAR

10.2.2 Medidas de optimización del consumo energético

A. Conjunto motor - bomba

10.2.2.1 Optimización de la Eficiencia Electromecánica

En este apartado se buscará incrementar la eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba o de alguno de los componentes (motor o bomba), para ello se deberán analizar todas las acciones que pueden aplicar seleccionando e implantando aquellas que resulten técnica y económicamente factibles.

10.2.2.1.1 Adecuación del equipo de bombeo al punto de operación real

El procedimiento para determinar una recomendación de este tipo consiste en definir al menos dos puntos (carga- gasto) donde opere el equipo de bombeo. Posteriormente se deberán analizar las características del equipo instalado (curva de operación) y evaluar si es recomendable una adecuación del mismo a las condiciones de operación (carga – gasto), tratando de hacerlo operar en el intervalo de máxima eficiencia.

En la tabla 63 se indican algunas acciones que pueden efectuarse para incrementar la eficiencia de la bomba, según la problemática.

Tipo de Bomba	Ubicación del punto de operación	Acción Correctiva
Centrífuga Vertical multietapa	Por encima de la curva de la bomba	Incrementar etapas, hasta lograr hacer pasar la curva de la bomba por el punto de operación
		Sustituir los impulsores por nuevos impulsores de mayor diámetro, siempre que sea posible
	Por debajo de la curva de la bomba	Eliminar etapas, hasta lograr hacer pasar la curva de la bomba por el punto de operación
		Recortar los impulsores al tamaño requerido, para que la curva de la bomba pase por el punto de operación
Centrífuga Horizontal	Por encima de la curva de la bomba	Sustituir los impulsores por nuevos impulsores de mayor diámetro, siempre que sea posible
	Por debajo de la curva de la bomba	Recortar los impulsores al tamaño requerido, para que la curva de la bomba pase por el punto de operación

TABLA 63 ACCIONES RECOMENDADAS PARA AJUSTAR LAS CURVA DEL EQUIPO DE BOMBEO A LA CONDICIÓN REAL DE OPERACIÓN

- **Metodología de cálculo:**

Paso 1. Con la ecuación 74 se deberá calcular la potencia hidráulica que demandará el motor una vez implementada la acción correctiva, posteriormente se determinará con base en el factor de carga del motor, la potencia que deberá suministrar al equipo de bombeo y con ello determinar en su curva de eficiencia el nuevo punto de operación. Con este valor se determina mediante la ecuación 77 un nuevo valor de eficiencia y con ello la potencia eléctrica del motor.

$$P_h = \frac{H_b * Q * \gamma * g}{1000}$$

ECUACIÓN 76

$$P_e' = P_e * \frac{\eta_m}{\eta_m'}$$

ECUACIÓN 77

Donde:

P_e = Potencia eléctrica demandada por el motor actual (kW).

P_e' = Potencia eléctrica que demandará el motor propuesto (kW).

η_m = Eficiencia de operación del motor actual (%).

η_m' = Eficiencia de operación del motor propuesto (%).

Paso 2. Calcular los ahorros por lograr. Con la condición inicial de potencia (P_e antes del ajuste de la bomba) y con la nueva potencia eléctrica determinada anteriormente, se deberá obtener el diferencial de potencia y energía consumida en el periodo de tiempo mediante las siguientes expresiones:

- Disminución de la potencia eléctrica demandada ΔP_e :

$$\Delta P_e = P_e - P_e'$$

ECUACIÓN 78

- Disminución de la energía eléctrica consumida ΔE :

$$\Delta E = \Delta P_e * hr_{oa}$$

ECUACIÓN 79

Donde: hr_{oa} es el número de horas de operación anual

- Disminución de la facturación eléctrica ΔF :

$$\Delta F = \Delta E - CUE$$

ECUACIÓN 80

Donde CUE es el costo unitario de la energía (\$/kWh)

10.2.2.1.2 Ajuste de la posición de los impulsores en bombas de turbina con impulsor abierto

- **Situación observada durante el diagnóstico:**

La bomba tipo turbina vertical, con impulsores abiertos presenta baja eficiencia de operación.

- **Acciones a implantar:**

Ajustar la flecha con los impulsores dentro del cuerpo de tazones, levantando o bajando la flecha por medio de la tuerca de ajuste. En la figura 95 se muestra el arreglo de los impulsores dentro del cuerpo de tazones de la bomba. Este ajuste se calibra en la flecha desde la instalación del equipo, siguiendo las indicaciones del fabricante. Si la posición de los impulsores, no quedó bien ajustada o se ha desajustado con el tiempo, se provoca una reducción de la eficiencia de la bomba.

El procedimiento para ajustar la flecha a la posición de diseño es el siguiente:

Paso 1. Quitar la tapa del motor vertical, para descubrir la tuerca de ajuste de la flecha (ver fig. 96)

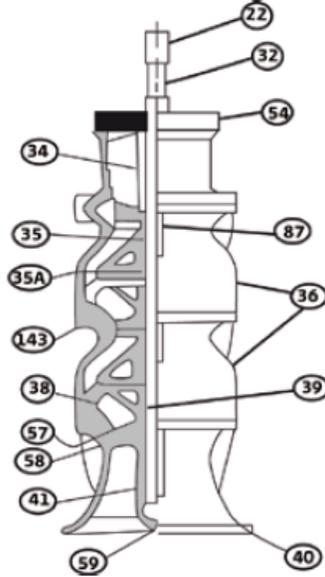
Paso 2. Desmontar el tornillo de seguridad, que impide se mueva la tuerca.

Paso 3. Una vez que la turca esté libre, se deberá aflojar hasta el momento que ya no sostiene el peso de la flecha. En ese momento se aprieta en forma manual hasta el tope. Cuando esto sucede, se toma la medida del sobrante de flecha por encima del nivel de la tuerca.

Paso 4. Se procede a levantar la flecha por medio del ajuste de la tuerca hasta el tope superior en el tazón, tomando nuevamente la medida correspondiente. La diferencia será el juego total que tienen los impulsores dentro del cuerpo de tazones. Este valor debe coincidir con el proporcionado por el fabricante. De no ser así indica desgaste del impulsor con el tazón.

ILUSTRACIÓN 95
 DIAGRAMA DE UNA
 BOMBA DE
 TURBINA DE
 FLECHA DE
 IMPULSOR ABIERTO
 Y SUS
 COMPONENTES³⁰

ENSAMBLE DE CUERPO DE TAZONES LUBRICACIÓN AGUA



Descripción:
 Impulsor tipo cerrada- tipo semiabierta
 Anillo de desgaste
 Cono de fijación
 Balanceado estáticamente

Tazón intermedio
 Hierro gris porcelanizado (recubrimiento vitreo)
 4850, 60EC, 7 Y 8 son roscados
 100, hasta 180 y 60AC
 Doble buje - hule y bronce
 Excepto 60 y 180 solo bronce

Tazón de descarga
 Alabes múltiples para el flujo uniforme
 Salida roscada para tubos de columna
 Bujes de bronce

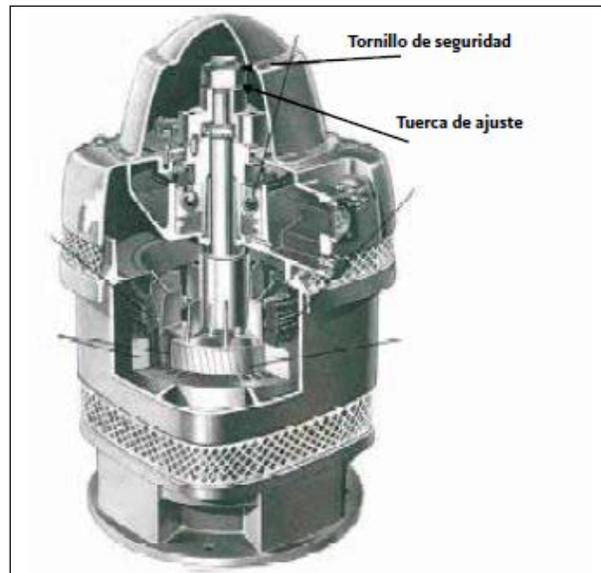
Campana de succión
 Bujes de bronce con collar arenoso
 Lubricado con grasa

Anillo de flujo
 Para un flujo uniforme

Flecha
 Sólida de acero inoxidable A.I.I.416
 con cople de acero

Lista de partes		
Parte No.	Descripción	Material
22	Cople para flecha de bomba	Acero
32	Flecha de bomba	Acero A.I.I.416
34	Buje de tazón de descarga	Bronce
35	Buje de tazón intermedio	Bronce
36A	Buje de tazón intermedio	Hule
36	Tazón intermedio	Hierro gris Vr
38	Impulsor	Bronce
39	Cono de fijación	Acero
40	Campana de succión	Bronce
54	Tazón de descarga	Hierro gris
57	Anillo de descarga del impulsor	Bronce-aluminio
58	Collar arenoso	Bronce
59	Tapón Macho	H. Gris galvanizado

ILUSTRACIÓN 96 DIAGRAMA DE UN MOTOR FLECHA HUECA ACOPLADO A UNA BOMBA DE TURBINA³¹



³⁰ Manual de Bombas Verticales BNJ S.A. de C.V

³¹ Manual de operación Byron Jackson para bombas de turbina

Paso 5. Para realizar el ajuste se debe aflojar nuevamente la flecha al tope donde el impulsor asienta con el tazón. Una vez realizado esto, se debe ajustar la flecha de acuerdo a las especificaciones del fabricante, mediante el apriete de la tuerca, subiendo la distancia recomendada por el fabricante, la cual depende del diámetro de la flecha y carga hidráulica.

- **Metodología³² de cálculo para nuevas condiciones:**

Paso 1. Determinar la eficiencia η_b con la que queda trabajando la bomba una vez realizado el ajuste a la posición de la flecha siguiendo el procedimiento de cálculo descrito en el capítulo 5.1.5.2 del presente manual.

Paso 2. Calcular la potencia eléctrica que demandará el equipo una vez implementada la acción correctiva.

Paso 3. Calcular los ahorros por lograr.

10.2.2.1.3 Optimización de la eficiencia del motor

El diagnóstico de la eficiencia de los motores eléctricos en operación, además del cálculo de la eficiencia real, implica un análisis de las posibles causas que la afectan, dependiendo de la condición anómala encontrada. Un resumen de estas causas se detalla en la tabla 59. En la tabla 64 se presentan las acciones correctivas recomendadas para los motores eléctricos que trabajan en condiciones de operación ineficiente.

Condición observada	Diagnóstico	Acción correctiva propuesta a evaluar su implantación
Tensión de alimentación por debajo del nominal	El voltaje en el punto de acometida está por debajo del nominal-	a) Corregir con los TAP's del transformador. (Los TAP's son los componentes físicos en forma de manija (cambiadores) de un transformador que se utilizan para graduar la relación de transformación de la tensión y ajustar la tensión de salida al motor para absorber las variaciones del suministrador)
		b) Solicitar al suministrador corrija el problema
	El voltaje en el punto de acometida presenta variaciones mayores al 5%.	a) Solicitar al suministrador corrija el problema
	El voltaje en el punto de acometida es el nominal y no presenta variaciones significativas.	a) Corregir con los TAP's del transformador
		b) Practicarle un diagnóstico y mantenimiento al transformador
Desbalance del voltaje de alimentación al motor	El voltaje en el punto de acometida está desbalanceado.	a) Solicitar al suministrador corrija el problema

³² Los pasos dos y tres se calculan de igual forma que en el capítulo 10.2.2.1.1

Condición observada	Diagnóstico	Acción correctiva propuesta a evaluar su implantación
	El voltaje en la acometida está balanceado y en el secundario del transformador desbalanceado.	a) Practicar un diagnóstico y mantenimiento al transformador
	El voltaje en los bornes del secundario del transformador está balanceado y en la alimentación al motor se encuentra desbalanceado.	a) Revisar la conexión de puesta a tierra del transformador y el motor, y en caso de que se detecten problemas, corregirlos b) Revisar las conexiones del CCM, arrancador y motor, y en caso de que se detecten problemas, corregirlos
Desbalance en la corriente demandada por el motor	El desbalance en corriente es inversamente proporcional al desbalance en voltaje.	a) Corregir el desbalance en tensión
	El desbalance es producido por una demanda desbalanceada por las fases del motor.	a) Si el desbalance es menor al 5%, practicarle un mantenimiento al motor b) Si el desbalance es mayor al 5%, sustituir el motor por un motor nuevo de alta eficiencia
La velocidad de operación del motor, está por debajo de la velocidad a plena carga	Problemas con rodamientos y/o cojinetes	a) Lubricar y en su caso sustituir los elementos con problemas
Alta temperatura y/o alta vibración en cojinetes y/o rodamientos		
El motor es de eficiencia estándar y tiene más de 10 años de operación	La eficiencia de operación del motor es baja.	a) Sustituir el motor actual por un motor nuevo de alta eficiencia de una capacidad tal, que opere cerca del 75% de su capacidad
El motor ha sido reparado (rebobinado), más de dos veces	La eficiencia del motor se encuentra depreciada.	
El motor se encuentra trabajando con un factor de carga menor al 45%	El motor se encuentra trabajando en una zona donde su eficiencia de operación es baja.	
El motor se encuentra trabajando con un factor de carga mayor al 100%	El motor se encuentra trabajando en una zona donde su eficiencia de operación es baja.	

TABLA 64 ACCIONES RECOMENDADAS PARA CORREGIR CONDICIONES DE OPERACIÓN INEFICIENTE DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS.

La aplicación de estas acciones puede mejorar sustancialmente la eficiencia de un motor eléctrico, y con ello reducir las pérdidas energéticas, por ejemplo, la reducción del 30% en las pérdidas de un motor de 10 HP con 82% de eficiencia, incrementa su valor a un 87.4%, lo cual también puede representar un beneficio significativo en el consumo energético.

Dentro de esta gama de acciones, las más recurrentes y sus respectivas recomendaciones se describen a continuación:

10.2.2.1.4 *Corregir los desbalances de tensión*

- **Situación observada durante el diagnóstico:**

Existe un desbalance de tensión en la alimentación eléctrica al motor, y por lo tanto está trabajando con una eficiencia depreciada.

- **Acciones a implantar:**

Dependiendo del origen del desbalance en voltaje, implantar las acciones que se indican en la tabla 65.

Origen del desbalance de voltaje	Acciones correctivas a implantar
Desbalance en la corriente demandada por el motor, la que produce una caída de tensión en cada fase, y por lo tanto el desbalance en tensión.	Practicar un mantenimiento al motor, y en caso de que el daño sea irreversible, sustituir el motor por un motor nuevo de alta eficiencia.
Desbalance de origen en la alimentación de la compañía suministradora.	Solicitarle a la compañía suministradora la corrección del problema.
Desbalance originado por el transformador de la subestación propia.	Practicar un mantenimiento al transformador, y en caso de que el daño sea irreversible, sustituir el transformador por un transformador nuevo de bajas pérdidas.
Desbalance originado por un desbalance en las cargas del transformador	Balancear las cargas del transformador.

TABLA 65 ACCIONES RECOMENDADAS PARA CORREGIR EL DESBALANCE DE VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN A LOS MOTORES ELÉCTRICOS

- **Metodología de cálculo:**

El efecto positivo de eliminar el desbalance de voltaje se refleja en la mejora de la eficiencia del motor cuyo beneficio se calcula como sigue:

Paso 1. Calcular la eficiencia a la que trabajará el motor, una vez corregido el desbalance de voltaje, siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo 10.1.4 del presente manual.

Paso 2. Calcular la potencia eléctrica que demandará el equipo una vez implementada la acción correctiva, mediante la ecuación 72, vista anteriormente.

Paso 3. Calcular los ahorros a lograrse. Se calculan de igual forma que en el capítulo 5.2.2.1.1 del manual.

Corregir el voltaje de suministro al motor

- **Situación observada durante el diagnóstico:**

Al motor se le está suministrando energía con un voltaje distinto al nominal y por lo tanto está trabajando con una eficiencia depreciada.

- **Acciones a implantar:**

Si el problema puede ser resultado ajustando los TAP's del transformador, aplicar dicho ajuste. En caso de que el problema sea ocasionado por la compañía suministradora, solicitar a ésta, que resuelva el problema.

- **Metodología de cálculo:**

Paso 1. Calcular la eficiencia a la que trabajará el motor, una vez corregido el problema de suministro de voltaje, siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo 10.1.4 del presente manual.

Paso 2. Calcular la potencia eléctrica que demandará el equipo una vez implementada la acción correctiva, mediante la ecuación 72

Paso 3. Calcular los ahorros a lograrse. Se calculan de igual forma que en el punto 10.2.2.1.1.

10.2.2.1.5 Sustitución del motor eléctrico por un motor de alta eficiencia

Esta medida es recomendable cuando se han agotado las posibles acciones que no impliquen la inversión que representa la sustitución del motor y se presenten las causas descritas en la tabla 62. Esta medida es altamente recomendable cuando el motor sufre una falla y es necesario repararlo.

- **Metodología de cálculo:**

Para evaluar los beneficios y rentabilidad de esta medida se siguen los siguientes pasos:

Paso 1. Calcular la eficiencia a la que trabaja el motor actual, siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo 10.1.4.1 del presente manual.

Paso 2. Proponer un motor nuevo de alta eficiencia y especificar su valor de eficiencia respectiva.

Los motores de alta eficiencia se diferencian de los motores estándar por las siguientes características:

- a) Utilización de acero con mejores propiedades magnéticas
- b) Reducción del entrehierro
- c) Reducción del espesor de la laminación

- d) Incremento en el calibre de los conductores
- e) Utilización de ventiladores y sistemas de enfriamiento más eficientes
- f) Utilización de mejores materiales aislantes

Paso 3. Cálculo de los ahorros de energía a obtener. Se calculan de igual forma que en el punto 10.2.2.1.1. En este caso debido a que la inversión si tiene un valor importante, se cotiza el motor de alta eficiencia propuesto y se evalúa la rentabilidad siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo 10.2.4, que se verá más adelante.

10.2.2.1.6 *Sustitución del conjunto Bomba - Motor*

Esta medida es recomendable cuando la eficiencia electromecánica haya resultado sustancialmente baja y el potencial de ahorro de energía con respecto a las NOM's determinado durante el DEE haya resultado de al menos el 20%. Es sabido que dicho potencial de ahorro de energía es incluso mejorable con equipos comercialmente disponibles.

También es importante revisar los valores de eficiencia reales estimados para los motores eléctricos por separado. El criterio general es que si el potencial para mejorar la eficiencia de los motores rebasa el 5%, es todavía más recomendable la sustitución del conjunto bomba-motor dado que el potencial de ahorro se asegura en ambos componentes y la medida puede ser sumamente rentable.

- **Metodología de cálculo:**

El procedimiento para evaluar el ahorro y rentabilidad de esta medida es el siguiente:

Paso 1. Calcular el costo anual de la energía consumida por el conjunto motor-bomba en operación.

Proponer una nueva bomba que trabaje en la zona de máxima eficiencia y calcular la eficiencia electromecánica cumpliendo las siguientes recomendaciones:

- Seleccionar el motor apropiado a la bomba seleccionada cuidando que el factor de carga esté entre el 70 y 80 %
- Verificar la eficiencia del motor y de la bomba seleccionados
- Calcular la eficiencia electromecánica combinando ambas eficiencias por medio de la ecuación 81.

$$\eta_{em} = \eta_b * \eta_m$$

ECUACIÓN 81

Paso 3. Calcular la potencia eléctrica que demandará el equipo una vez implementada la acción correctiva, mediante la ecuación 82.

$$P'_{emb} = P_{emb} * \frac{\eta_{em}}{\eta'_{em}}$$

ECUACIÓN 82

Donde:

P_{emb}' =Potencia eléctrica esperada con el conjunto motor-bomba de mejor eficiencia.

P_{ebm} = Potencia eléctrica que demanda el conjunto motor-bomba actualmente.

η_{em} = Eficiencia actual del conjunto motor-bomba.

η_{em}' = Eficiencia esperada de la bomba.

Paso 4. Calcular de los ahorros a obtener de acuerdo al procedimiento del capítulo 10.2.2.1.1 de este manual.

Paso 5. Cotizar el conjunto motor – bomba propuesto, y evaluar la rentabilidad siguiendo el procedimiento descrita en el capítulo 10.2.4 de este manual.

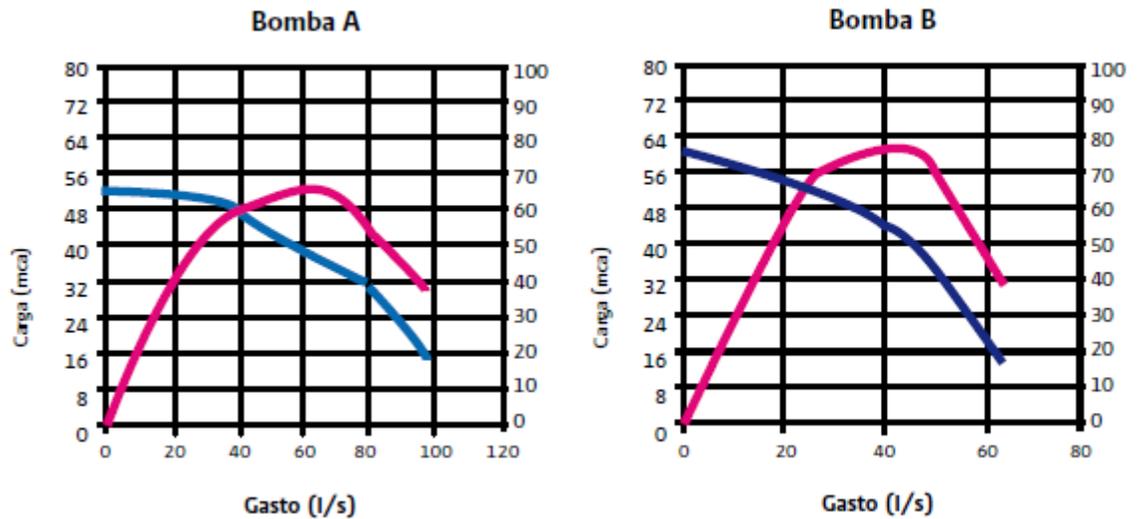
- **Recomendaciones para la selección de la bomba:**

Para aumentar las posibilidades de éxito y asegurar el ahorro de energía proyectado, es importante seleccionar el equipo de bombeo entre varias marcas comerciales disponibles, tomando en cuenta lo siguiente:

- a) No calcular márgenes de seguridad irreales o incluir en la especificación información inapropiada.
- b) Si la bomba tiene que operar en más de un punto de carga hidráulica-gasto, hay que seleccionarla para que en ambos puntos presente una eficiencia “razonablemente alta”. Como ilustración de esta recomendación, se muestra en la figura 5.26 el ejemplo de dos equipos de bombeo que tienen curvas de operación diferentes. Como se puede ver, la bomba “B”, con una curva más plana sería la adecuada para la aplicación de cambios frecuentes en el nivel dinámico, mientras que la bomba “A” sería más favorable cuando es más estable el nivel.

Se recomienda, que una vez instalado el equipo, se verifique el punto de operación del mismo, y en su caso, hacer las adecuaciones necesarias.

ILUSTRACIÓN 97
CURVAS
TÍPICA DE DOS
EQUIPOS DE
BOMBEO CON
CURVAS H-Q
DIFERENTES.



10.2.2.2 Mantenimiento preventivo y predictivo

Como parte del PEE, se debe recomendar la implementación de un programa de mantenimiento predictivo y preventivo. Dentro de los principales beneficios que se obtienen con un buen programa de mantenimiento a las instalaciones, se tienen:

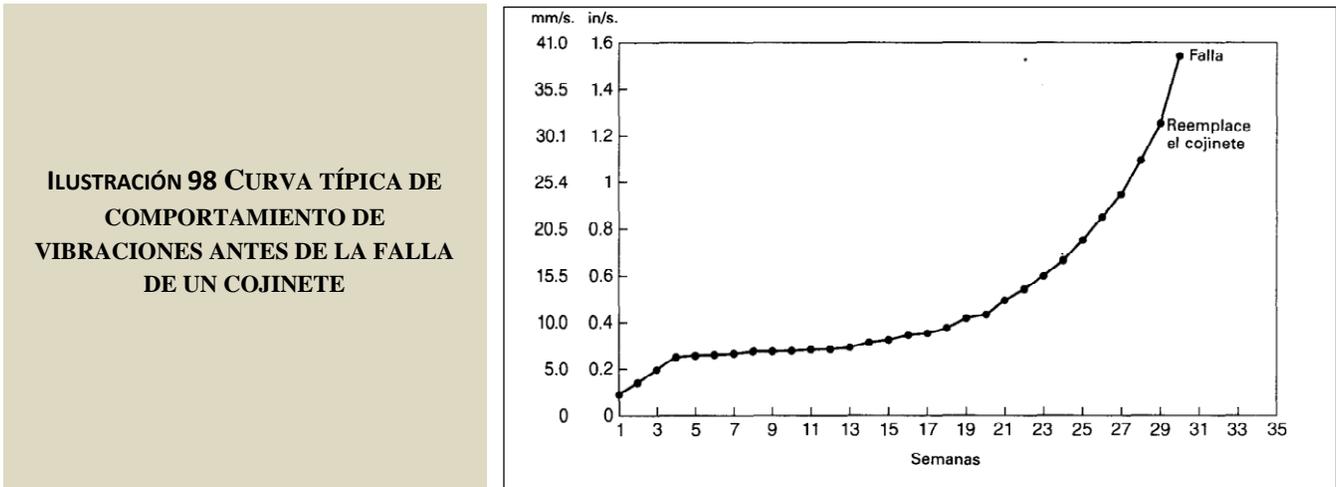
- a) Mayor disponibilidad del equipo.
- b) Mayor capacidad de bombeo.
- c) Mayor confiabilidad en el equipo.
- d) Operación mejor planeada y más eficiente.
- e) Mejor servicio a la población.
- f) Menor estrés del personal.
- g) Disminución de costos de operación y administración.
- h) Incremento de la vida útil de los equipos.
- i) Disminución de los requerimientos de inversión.
- j) Ahorro de energía.
- k) Ahorro económico.

El mantenimiento predictivo consiste en establecer, en primer lugar, una perspectiva histórica de la relación entre la variable seleccionada y la vida del componente. Para esto se recomendará la toma de lecturas de los parámetros más importantes para predecir fallas y actuar en consecuencia de manera oportuna. Desde el punto de vista del consumo de energía, se trata de que los equipos “mantengan” sus eficiencias originales. Los parámetros que se recomienda monitorear son los siguientes:

- Monitoreo periódico de parámetros relacionados con la eficiencia electromecánica.

- Monitores de parámetros mecánicos como vibración y temperaturas.

El monitoreo de vibraciones de los conjuntos bomba – motor es fundamental para detectar fallas antes de que sucedan. Por ejemplo, el monitoreo de la vibración de un cojinete puede ayudar a tomar la determinación de cambiarlo antes de que falle. En la figura 98 se muestra el comportamiento típico de los valores medidos antes de la falla.



En la figura 99 se muestra una inspección típica de nivel de vibración y el equipo típico utilizado en la misma.



10.2.2.3 Optimización de cargas de bombeo

10.2.2.3.1 Corrección de defectos en la configuración de tuberías de descarga y en la operación

- **Situación observada durante el diagnóstico:**

Este punto aplica para aquellos sistemas de bombeo que durante el DEE se haya determinado que tienen algún problema en la configuración de su tubería de descarga que esté ocasionando un bajo rendimiento energético de alguno o todos los equipos involucrados, como recirculaciones innecesarias, contrapresiones que eviten el flujo adecuado desde un equipo determinado, entre otras.

- **Acciones a implantar:**

Las recomendaciones en este caso será la modificación de los trenes de descarga o configuración de las conducciones primarias para evitar los problemas mencionados.

- **Metodología de cálculo:**

Esta va a depender de la situación que se haya encontrado, que puede derivar por ejemplo, en una mejora en el caudal producido o evitar la operación de un equipo que no esté siendo productivo.

10.2.2.3.2 Reducción de pérdidas por cortante en conducciones

La reducción de pérdidas por el efecto cortante del agua sobre las paredes de la tubería se aplica para disminuir el impacto energético que representan las conducciones con altas velocidades, que en algunos casos pueden alcanzar el 30% de la potencia demandada por el equipo de bombeo.

- **Situación observada durante el diagnóstico:**

La velocidad del agua dentro de la tubería es superior a las 2.0 m/s.

- **Acciones a implantar:**

Evaluar las acciones descritas a continuación y seleccionar aquella que resulte más rentable.

- a) Si la tubería ya tiene varios años en operación y se encuentra en mal estado, proponer la sustitución de la tubería actual por una de mayor diámetro, con la que se logren velocidades del agua entre 1.0 y 1.5 m/s.
- b) Si la tubería se encuentra en buen estado, analizar las siguientes opciones:
 - b.1. Instalar una tubería en paralelo a la actual, de un diámetro tal, que se reduzca la velocidad del agua a un valor de entre 1.0 y 1.5 m/s.

b.2. Sustituir la tubería actual por una de mayor diámetro, con la que se logren velocidades del agua de entre 1.0 y 1.5 m/s.

- **Metodología de cálculo:**

Paso 1.- Calcular las pérdidas por cortante, que se tienen en la tubería actual y en la tubería propuesta, mediante la metodología descrita en la sección E.2 del **Anexo E**.

Paso 2.- Calcular la disminución de la potencia eléctrica demandada por el motor, mediante la ecuación 83.

$$\Delta P_e = \frac{[(h_{fta} - h_{ftp}) * Q * \gamma * g]}{\eta_{em} * 1000}$$

ECUACIÓN 83

Donde:

- ΔP_e = Disminución de la potencia eléctrica demandada.
- h_{fta} = Pérdidas por cortante en la tubería actual (m).
- h_{ftp} = Pérdidas por cortante en la tubería propuesta (m).
- Q = Caudal que pasa por la tubería (m³/s).
- γ = Peso específico del agua (kg/m³).
- g = Aceleración de la gravedad (m/s²).
- η_{em} = Eficiencia electromecánica del sistema de bombeo involucrado.

Paso 3.- Calcular los ahorros de energía eléctrica de igual forma que en el capítulo 10.2.2.1.1 de este manual.

Paso 4.- Cotizar la obra implícita para el cambio de la tubería propuesta y evaluar la rentabilidad siguiendo la metodología descrita en el apartado 10.2.4.

10.2.2.4 Control de Presiones y Caudales

En este capítulo, se analizarán las medidas de ahorro de energía resultantes de controlar la presión y los caudales en las redes de distribución

10.2.2.4.1 Instalación de variadores de frecuencia

- **Situación observada durante el diagnóstico:**

En aquellos sistemas con suministro directo a red, donde la demanda de agua es variable y que durante la evaluación de consumos energéticos por estas variaciones hayan resultado atractivos durante el DEE, fundamentalmente por sus niveles de consumo y costo energético, se recomienda proponer y evaluar la opción de aplicar un sistema de velocidad variable en el equipo de bombeo.

- **Acciones a implantar**

Implementar un sistema de control de presión y caudal por medio de un variador de frecuencia electrónico adaptado al motor eléctrico.

- **Metodología de cálculo:**

Para implementar correctamente esta medida y calcular los ahorros resultantes de la misma se procede de la forma siguiente:

Paso 1. Seleccionar los equipos resultantes como viables en el DEE y considerar sus consumos energéticos operando sin variador de frecuencia así como las presiones y caudales registrados durante los monitoreos realizados durante el mismo.

Paso 2. Seleccionar la presión óptima de operación para cada sistema de distribución de agua potable, en función de lo siguiente:

1. La presión óptima de operación es la presión más baja a la que podría operar el sistema sin dejar de proporcionar el servicio en ningún punto de la red. Ésta suele ser el valor más bajo registrado durante el monitoreo, por lo que habrá que verificar en campo o en un modelo de simulación hidráulica, si operando con dicha presión, se sigue suministrando agua en los puntos más altos de dicha red.
2. Si con la presión mínima registrada en el monitoreo, se logra que el agua llegue bien a todos los puntos de la red, verificar en campo, hasta que valor es posible bajar la presión, sin menoscabo del servicio. Dicho valor de la presión será la presión óptima de operación.
3. Si con la presión mínima registrada en el monitoreo, no se cumple que el agua llegue bien a todos los puntos de la red, verificar en campo, hasta que valor es necesario subir la presión, para que el agua alcance la presión adecuada en todos los puntos de la red. Dicho valor de la presión, será la presión óptima de operación.

Paso 3. Calcular la energía eléctrica que se ahorrará de acuerdo con lo siguiente:

1. Calcular el perfil de presión disminuida.

Para cada uno de los registros obtenidos durante el monitoreo, calcular la disminución de la presión e descarga, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Si } p_{op} > p_r \rightarrow \Delta p_r = 0.0$$

$$\text{Si } p_{op} < p_r \rightarrow \Delta p_r = p - p_{op}$$

Donde:

- p_{op} = Presión óptima de operación (kg/cm²).
 p_r = Presión registrada en el monitoreo (kg/cm²).
 Δp_r = Disminución de la presión para ese registro (kg/cm²).

2. Calcular el perfil de potencia eléctrica ahorrada.

Para cada uno de los registros obtenidos durante el monitoreo, calcular la potencia eléctrica que se ahorrará con la instalación de un variador de velocidad que mantenga la presión en el valor óptimo obtenido en el paso anterior, mediante la ecuación 84.

$$\Delta P_e = \frac{\Delta p_r * Q * 9.81}{\eta_{em}}$$

ECUACIÓN 84

Donde:

- ΔP_e = Potencia eléctrica ahorrada (kW).
 Δp_r = Disminución de la presión de descarga (m.c.a.).
 Q = Caudal (l/s).
 η_{em} = Eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba.

3. Calcular la energía ahorrada con la ecuación 85.

$$\Delta E = \sum_{i=2}^{n_{im}} \left[\frac{(\Delta P_{e,i} + \Delta P_{e,i-1})}{2} * (hr_i - hr_{i-1}) \right]$$

ECUACIÓN 85

Donde:

- ΔE = Energía ahorrada en el periodo de medición (24 horas).
 $\Delta P_{e,i}$ = Potencia eléctrica ahorrada en la lectura i.
 hr_i = Hora a la que se tomó la lectura i.
 n_{im} = Número total de lecturas tomadas durante el tiempo de monitoreo.

4. Calcular los ahorros anuales que se obtendrán con la implantación de la medida con la ecuación 86.

$$A\$\$ = \Delta E * CUE$$

ECUACIÓN 86

Donde:

- A\$ = Ahorro económico anual que se obtendrá con la implementación del variador (\$/año).
 ΔE = Energía anual que es viable ahorrar con la implementación del variador (kWh/año).
 CUE = Costo unitario de la energía (\$/kWh).

Una vez determinados los ahorros de energía eléctrica, se estima el monto de las inversiones necesarias para la implantación de esta medida de ahorro y se realiza la evaluación económica del proyecto de inversión, siguiendo la metodología descrita en el apartado 10.2.3.

10.2.2.4.2 Instalación de tanques de regulación

Es posible que, en algunas situaciones donde se esté suministrando agua directamente a la red, se requiera la instalación de un tanque de regulación para reducir la capacidad del sistema de bombeo trabajando a gasto medio y por ende la potencia eléctrica del mismo. Esta situación se analiza de la forma siguiente:

- **Situación observada durante el diagnóstico:**

El suministro de agua es directo a red con una potencia exigida de acuerdo al gasto máximo horario.

- **Acciones a implantar:**

Instalar un tanque de regulación o utilizar algún tanque disponible, reduciendo la potencia del equipo de bombeo.

- **Metodología de cálculo:**

Paso 1. Calcular el caudal y carga hidráulica total que tendrá el equipo de bombeo trabajado hacia el tanque de regulación.

Paso 2. Calcular la potencia eléctrica que demandará el equipo de bombeo, una vez implementada la acción correctiva, mediante la ecuación 87.

$$P'_{eQm} = \frac{H_{tmb} * Q}{(H_{tmb} * Q)} * P_{eQm}$$

ECUACIÓN 87

Donde:

- P_{eQm}' =Potencia eléctrica esperada con el caudal medio.
 P_{eQm} = Potencia eléctrica que demanda el conjunto motor-bomba actualmente con el caudal medio.
 $(H_{tmb} * Q)$ = Producto de la carga hidráulica por el caudal, actual del conjunto motor-bomba.

$(H_{tmb} * Q)'$ = Producto de la carga hidráulica por el caudal, esperada del conjunto motor-bomba.

Paso 3. Cálculo de los Ahorros de energía eléctrica de acuerdo al procedimiento del capítulo 10.2.2.1.1.

Paso 4. Cotizar la obra que implica la instalación del nuevo tanque y conjunto motor – bomba propuestos y evaluar la rentabilidad.

10.2.2.5 Optimización de instalaciones eléctricas

Esta medida consiste en corregir los problemas detectados durante la inspección y levantamiento de datos de campo realizados durante el DEE, particularmente de aquellos aspectos que pueden reducir el consumo energético.

Para efectos del proyecto de eficiencia energética, los aspectos más importantes a evaluar son:

- a) Reducción del desbalance de voltaje.
- b) Corrección del voltaje de suministro al motor.
- c) Optimización del factor de potencia.
- d) Reducción de pérdidas eléctricas por efecto Joule.
- e) Reducción de pérdidas en transformadores.

Los dos primeros factores se describieron en conjunto con el proyecto de optimización de la eficiencia del motor eléctrico en el capítulo 10.2.2.1.3 dada su intrínseca relación con este aspecto.

Los otros tres y las acciones a desarrollar dentro del PEE se describen enseguida.

10.2.2.5.1 Optimización del factor de potencia (FP)

El objetivo de esta medida será eliminar los problemas ocasionados por un bajo FP, descritos en el capítulo 10.1.3.4, y evitar la posible penalización en la factura energética en caso de tener un FP menor al 90 %, así como lograr la máxima bonificación al compensarlo a valores cercanos a la unidad.

- **Situación observada durante el diagnóstico:**

El factor de potencia en el equipo de bombeo registrado por la compañía suministradora es menor a 0.93.

- **Acciones a implantar:**

Si el bajo factor de potencia es originado por motores sobredimensionados o trabajando en malas condiciones, sustituir dichos motores, por motores nuevos de alta eficiencia con una capacidad tal que operen alrededor del 75% de carga.

Una vez resuelto el problema de los motores, compensar el factor de potencia con bancos de capacitores, mediante el siguiente procedimiento:

- a) Medir el factor de potencia.
- b) Proponer la instalación de un banco de capacitores, con una capacidad tal para elevar el factor de potencia a niveles del orden de 0.97.

- c) Instalar los capacitores propuestos, corriente abajo del arrancador del motor, de manera tal que únicamente queden energizados, cuando se energice el motor.

- **Metodología de cálculo:**

Paso 1. Calcular la capacidad requerida del capacitor a proponer, mediante la ecuación 88.

$$Cap_o = P_{edm} \left\{ \frac{\sqrt{1 - FP^2}}{FP} - \frac{\sqrt{1 - (0.97)^2}}{0.97} \right\}$$

ECUACIÓN 88

Donde:

Cap_o = Capacidad requerida del capacitor.

P_{edm} = Potencia eléctrica demandada por el motor.

FP = Factor de potencia del motor medido.

Y seleccionar la capacidad C_{bc} del banco de capacitores comercial, que más se le aproxime al valor de C_o.

Paso 2. Calcular el valor del factor de potencia, que alcanzará la instalación con el banco de capacitores propuesto, mediante la ecuación 89.

$$FP' = \frac{P_e}{\sqrt{P_e^2 + (Cap_o - Cap_{bc})^2}}$$

ECUACIÓN 89

Paso 3. Calcular los ahorros de energía eléctrica con el criterio siguiente:

Si FP > 0.9:

$$\Delta\$ = \$d_c * 0.225 \left(\frac{1}{FP} - \frac{1}{FP'} \right)$$

ECUACIÓN 90

Si FP < 0.9:

$$\Delta\$ = \$d_c * \left(0.85 - \frac{0.54}{FP} - \frac{0.225}{FP'} \right)$$

ECUACIÓN 91

Donde:

- $\Delta\$$ = Ahorros en el importe de la facturación eléctrica.
- $\$d_c$ = Importe promedio por los conceptos de consumo y demanda de energía eléctrica.
- FP = Factor de potencia actual.
- FP' = Factor de potencia esperado.

Paso 4. Comparar el ahorro económico resultante con el costo de la instalación del banco de capacitores, para evaluar la rentabilidad de dicha medida, siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo 10.2.4 de este manual.

10.2.2.5.2 Adecuación de calibres de conductores

En caso de que se haya detectado que los calibres de los conductores no son del calibre que requiere el equipo de bombeo, se debe seleccionar un conductor que no solo cumpla con la NOM sino que además ahorre energía.

- **Situación observada durante el diagnóstico:**

Los conductores eléctricos se encuentran en mal estado y/o sobrecargados o cerca de su límite de capacidad de carga.

- **Acciones a implantar:**

Sustituir los conductores actuales, por conductores nuevos de mayor calibre.

- **Metodología de cálculo:**

Paso 1. Calcular la resistencia unitaria del conductor en las condiciones actuales.

- a) Medir el voltaje entre fase y neutro, en dos puntos del conductor, separados una distancia L_0 (mientras mayor sea la distancia, mayor confiabilidad en los resultados).
- b) Medir con el amperímetro la corriente circulante
- c) Calcular la caída de voltaje ΔV como la diferencia entre las dos mediciones efectuadas.
- d) Calcular la resistencia unitaria mediante la ecuación 92.

$$R_u = \frac{\Delta V_{\text{voltaje}}}{I * Long}$$

ECUACIÓN 92

Donde:

- R_u = Resistencia real del conductor (Ω/m).
- $\Delta V_{\text{voltaje}}$ = Caída de voltaje (volts).
- I = Corriente (Amperes).

Long = Distancia entre los dos puntos de medición del voltaje (m).

Paso 2.- Calcular la disminución de las pérdidas eléctricas en el conductor con la aplicación esta medida de ahorro de energía con la ecuación 93.

$$\Delta P_e = \frac{(R_r - R_r') * I^2 * Long_c}{1000}$$

ECUACIÓN 93

Donde:

ΔP_e = Disminución de las pérdidas eléctricas (kW).

R_r = Resistencia real del conductor actual (Ω/m).

R_r' = Resistencia del conductor propuesto (Ω/m).

I = Corriente (Amperes).

$Long_c$ = Longitud total del conductor (m).

Paso 3. Calcular los ahorros de energía eléctrica de igual forma que en el capítulo 10.2.2.1.1 del manual.

10.2.2.5.3 Reducción de pérdidas en transformadores

Aun cuando esta medida no representará en forma directa ahorros de energía al organismo operador, ya que se verán reflejados estos ahorros solo en caso de que se tenga medición del lado de alta tensión. Sin embargo estas medidas pueden ayudar a tener en buenas condiciones la subestación eléctrica, o cuando durante la inspección de las instalaciones eléctricas o por cumplimiento de la NOM, deben aplicarse acciones correctivas, y se debe evaluar el costo para corregir dicha falla. La evaluación se realiza de la forma siguiente:

- **Situación observada durante el diagnóstico:**

Las pérdidas de energía eléctrica en el transformador representan más del 2% del consumo total de la energía, solo aplica cuando se tiene medición del lado de alta tensión, o cuando se detecta sobrecalentamiento del transformador, o alguna anomalía en el cumplimiento con la NOM.

- **Acciones a implantar:**

Dependiendo de la problemática en particular, se deberán aplicar las acciones indicadas en la tabla 66:

Condición observada	Acción recomendada
El transformador tiene muchos años en operación y/o se encuentra en mal estado.	Practicar un mantenimiento general al transformador y en caso de presentar daños irreversibles sustituirlo

	por uno nuevo de bajas pérdidas.
El transformador presenta una alta temperatura, debido a falta de ventilación en el cuarto donde se encuentra instalado.	Mejorar la ventilación en el cuarto donde se encuentre el transformador, ya sea mediante la instalación de extractores, o abriendo ventanas para ventilación del local.
El transformador presenta alta temperatura de operación, debido a las altas temperaturas ambientes.	Instalar un sistema de ventilación forzada al transformador.

TABLA 66 ACCIONES RECOMENDADAS PARA MEJORAR LAS CONDICIONES EN UN TRANSFORMADOR

- **Metodología de cálculo³³:**

Paso 1. Calcular la eficiencia con la que trabajará el transformador, siguiendo la metodología de cálculo descrita en la sección E.2 del **Anexo E** del presente manual.

Paso 2. Calcular la disminución de la potencia eléctrica que demandará el transformador una vez implementada la acción correctiva, mediante la ecuación 94.

$$\Delta P_{et} = \frac{\eta_{trans}}{\eta'_{trans}} P_{et}$$

ECUACIÓN 94

Donde:

ΔP_{et} = Disminución de la potencia eléctrica esperada.

P_{et} = Potencia eléctrica que demanda el equipo actualmente.

η_{trans} = Eficiencia actual del transformador.

η'_{trans} = Eficiencia esperada del transformador.

Paso 3. Calcular los ahorros de energía de igual forma que en la sección 10.2.2.1.1 del manual.

³³ Para los casos en que se presenten pérdidas por incremento de temperatura y se tengan que instalar dispositivos de enfriamiento (ventiladores), se deberá de realizar el análisis correspondiente contra costos energéticos adicionales por estos equipos. Asimismo, se recomienda revisar la factibilidad de cambios de ubicación o aperturas naturales de ventilación (en techo para que salga el aire caliente) para evitar estos gastos.

10.2.3 Medidas que reducen el costo energético

Este tipo de medidas, aunque no representan una reducción en el consumo energético, tienen una importancia fundamental en cualquier proyecto de eficiencia energética, ya que sus aportaciones a la reducción del costo y por ende a la viabilidad del proyecto en su conjunto son vitales.

Entre las medidas más comunes en este rubro tenemos las siguientes:

- a) Selección de la tarifa eléctrica óptima para las instalaciones de agua.
- b) Control de demanda en hora punta (Ésta es aplicable a servicios contratados en tarifas horarias).

En el **Anexo D** se presenta una descripción a detalle de la estructura tarifaria aplicable en México.

10.2.3.1 Selección de la estructura tarifaria

Un área de oportunidad de ahorro siempre atractiva en los sistemas de bombeo, consiste en cambiar la tarifa contratada con la compañía suministradora de energía eléctrica, por alguna otra que resulte más rentable. Las tarifas de energía eléctrica comprenden las disposiciones específicas que contienen las cuotas y condiciones que rigen para los suministros de energía eléctrica agrupados en cada clase de servicio³⁴.

Las tarifas usualmente aplicables a Organismos Operadores de Sistemas de Agua Potable y Saneamiento son las siguientes:

Tarifa 6.-	Específica para los sistemas de agua.
Tarifa OM.-	Ordinaria en Media Tensión.
Tarifa HM.-	Horaria en Media Tensión.
Tarifas de cargo fijo	Que aplica a tarifas en media tensión y entra vigor a partir de Enero de 2009.

Para facilitar el análisis y procesamiento de la información de tarifas es conveniente el uso de formatos, los cuales se presentan en el **Anexo D** de este manual.

El proyecto de optimización tarifaria, se compone de dos etapas:

Etapas 1. Identificar las tarifas en que se encuentran todos y cada uno de los servicios del organismo operador, así como sus capacidades instantáneas y consumos. Con esta información se inicia el análisis de las tarifas contratadas.

Etapas 2. Comprende la evaluación de las posibilidades de ahorro en el costo de energía eléctrica con las diferentes tarifas aplicables de acuerdo a los siguientes criterios:

- **Sistemas conectados en baja tensión:**

³⁴ Se recomienda conocer las tarifas existentes visitando la página electrónica de Comisión Federal de Electricidad (<http://www.cfe.gob.mx>), específicamente en la sección "Información al Cliente, Conoce tu Tarifa", y de Luz y Fuerza del Centro (<http://www.lfc.gob.mx>) en la sección "Servicios al Cliente, Tarifas en Alta, Media y Baja Tensión".

En sistemas de bombeo con suministro en baja tensión, analizar las siguientes alternativas:

- a) Si está contratado en tarifa 2 ó 3, evaluar el cambiar a tarifa 6, o considerar la instalación de un transformador y cambiarse a tarifa OM.
- b) Si está contratado en tarifa 6, evaluar la instalación de un transformador y cambiarse a tarifa OM o HM (tarifas en media tensión).

- **Sistemas conectados en media tensión:**

En sistemas de bombeo con suministro en media tensión, analizar las siguientes alternativas:

- a) Si la demanda es menor a 100 kW, evaluar entre las tarifas 6, OM, y HM cual resultaría más económica y si no se está contratado en la más económica de las tres, solicitar la incorporación a esta tarifa.
- b) Si la demanda es mayor a 100 kW, evaluar entre las tarifas 6 y HM que resultare más económica y si no se está contratado en la más económica, solicitar la incorporación a esta tarifa.
- c) Si la demanda es mayor a 1000 kW, considerar la instalación de una subestación en alta tensión, verificar con la compañía suministradora la disponibilidad de suministro a ese voltaje, y en caso de haber disponibilidad, calcular los ahorros a lograrse con la incorporación a la tarifa en alta tensión y realizar la evaluación económica de realizar la inversión en la subestación. Este es un caso muy especial, debido a que se tendrá que considerar un cambio de subestación del usuario así como todos los dispositivos de control y protección necesarios.

- **Sistemas conectados en alta tensión:**

En sistemas de bombeo con suministro en alta tensión, analizar el tipo de suministro y si está en nivel subtransmisión, evaluar entre las tarifas 6, HS, y HSL, cuál resultaría más económica y si no se está contratado en la más económica de las tres, solicitar la incorporación a esta tarifa.

10.2.3.2 Control de la demanda en hora punta

En instalaciones en donde el suministro de energía eléctrica esté contratado en tarifa horaria (HM), se recomienda analizar las alternativas para la implantación de un sistema de control de la demanda, en combinación con el Proyecto de Eficiencia Hidráulica descrito en el capítulo cuatro de este manual, con el fin de que esta medida se haga mayormente viable.

Esencialmente, de lo que se trata es de disminuir la carga hidráulica en operación durante el horario de punta, para bajar con ello el monto de la demanda facturable, y como consecuencia el importe que por ese concepto se paga a la compañía suministradora.

El control de la demanda podrá realizarse por cualquiera de los siguientes métodos:

- a) Modificación de los procedimientos de operación para disminuir carga en el horario de punta.
- b) Instalación de temporizadores para parar equipos antes del inicio del horario de punta y ponerlos en operación al término de dicho horario.
- c) Implantación de un sistema de control automático, que pare equipos como función de la demanda, y los ponga en operación como función de algún parámetro del proceso, tal como presión o nivel.

Los pasos a seguir para el cálculo de beneficios económicos dentro del desarrollo del proyecto son los siguientes:

Paso 1. Calcular la demanda facturable promedio actual, así como los consumos de energía promedio en punta, intermedio y base.

Paso 2. Determinar las condiciones hidráulicas que se tendrán para parar en horario de punta, así como la que se tendrán que implementar fuera del horario de punta y la demanda facturable.

Proponer una nueva forma de operación de los equipos, de manera tal que la carga en horario de punta sea la menor posible. Para ello, apoyarse con la capacidad de regulación de los tanques.

Como resultado de este análisis calcular la carga que estará operando en cada uno de los horarios, así como el número de horas de operación al mes, de manera que se pueda calcular la energía que se consumirá en cada uno de los horarios.

Energía (kWh)			Demanda Máxima (kW)		
Punta	Intermedio	Base	Punta	Intermedio	Base
Ep'	Ei'	Eb'	Dp'	Di'	Db'

Paso 3. Determinar los ahorros a obtener con la medida.

- 1) Calcular el importe de la facturación actual.
- 2) Calcular el importe de la facturación esperado.
- 3) Calcular los ahorros económicos a lograrse

En caso de que las medidas a implantarse requieran inversiones, realizar la evaluación económica del proyecto de inversión, siguiendo la metodología descrita en el apartado 10.2.4 del presente manual.

10.2.4 Evaluación económica de las medidas de ahorro de energía y reducción de costos

Para todas las medidas de ahorro de energía evaluadas y de reducción de costos, se debe calcular el costo-beneficio de la inversión a realizar si es el caso; un método sencillo que se propone es el siguiente:

Calcular el periodo simple de recuperación de la inversión con la ecuación 95.

$$Per_{ri} = \frac{Inv_{mae}}{A\$_{eco}}$$

ECUACIÓN 95

Donde:

Per_{ri} = Periodo de recuperación de la inversión (años).

Inv_{mae} =Monto de la inversión necesaria para la aplicación de la medida de ahorro propuesta (\$).

A\$_{eco} = Ahorro económico anual que se obtendrá con la implantación de la medida de ahorro propuesta (\$/año).

10.2.5 Elaboración del reporte final del proyecto de eficiencia energética

El paso final para conformar un proyecto de eficiencia energética es preparar un reporte que contenga las observaciones y conclusiones del DEE y del PEE, haciendo énfasis en las oportunidades de ahorro de energía, y el plan de acción para implantarlas, conteniendo las bases y los pasos seguidos en el análisis. Un buen reporte deberá contener la información que se detalla a continuación:

a. Resumen Ejecutivo:

El propósito del resumen es el de permitir a la alta gerencia del organismo operador, el obtener en forma breve todos los resultados importantes, y entender de inmediato los resultados del diagnóstico, así como los costos y beneficios de las recomendaciones. Este resumen no deberá de sobrepasar cuatro cuartillas.

Este capítulo debe incluir una tabla resumen de ahorros de energía globales distinguiendo las medidas convencionales o de rápida implementación, descritas en la tabla 60 y las medidas resultantes de la operación hidráulica descritas en el capítulo 10.2.6.1.

Los principales datos a integrar en dicha tabla resumen son los siguientes:

- 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.
- Porcentaje de ahorro por medida. Se calcula dividiendo el ahorro por cada medida entre el consumo y costo energético anual actual.
- Costo de inversión total para cada medida.
- Rentabilidad de las inversiones a realizar al menos por el método de tiempo simple de retorno de la inversión; esto es dividiendo el valor de la inversión entre el ahorro económico anual.
- Los totales de ahorro de energía, económicos y sus porcentajes sirven también para distinguir el ahorro adicional al logrado con medidas convencionales como las descritas en la tabla 62 con las medidas resultantes de la operación hidráulica descritas más adelante en la sección 10.2.6.1.

b. Descripción de las instalaciones evaluadas:

En esta parte se da a conocer la situación de las instalaciones del organismo operador en el momento en que se realizó el diagnóstico. Éste deberá contener un resumen con datos básicos de las instalaciones y contendrá:

- Datos generales de las instalaciones electromecánicas (equipos y condiciones)
- Descripción general del sistema de producción y distribución de agua potable y saneamiento - captaciones y distribuciones (pozo a tanque, pozo a red, combinada, gastos extraídos, etc.)-

c. Análisis de consumos energéticos:

En este capítulo se presentan los datos recopilados y analizados con referencia al consumo energético en las instalaciones. La descripción de la situación energética deberá de venir acompañada por gráficas para fácil comprensión como las siguientes:

- Consumos energéticos anuales; incluyendo demanda eléctrica máxima de todas las instalaciones y servicios contratados por el organismo.
- Tarifas eléctricas aplicables.
- Balance energético global del organismo operador.
- Variaciones mensuales de consumo de energía y producción (costos).

- Presentación de indicadores que sean aplicables partiendo de los resultados generados del análisis y gráficas obtenidas.

d. Recomendaciones y medidas de ahorro:

Se describirá el estado de las instalaciones y la problemática encontrada en la propia instalación y el mantenimiento de la misma

- La primera parte de este apartado describirá la situación encontrada en los sistemas electromecánicos del organismo y las observaciones del equipo auditor. Se presentará una apreciación general del estado de las instalaciones.
- En la segunda parte se presentarán las oportunidades de ahorro. Cada una de las cuales deberá venir con los siguientes incisos:
 - **Recomendación:** Descripciones claras y concisas de las acciones a tomar para poder lograr los ahorros esperados.
 - **Estimación de Ahorro:** Presentación de las suposiciones y los cálculos que se hicieron para llegar al ahorro estimado de la recomendación.
 - **Estimación de Inversión:** Explicación de las suposiciones y los cálculos que se hicieron para llegar a la inversión requerida para realizar la recomendación.
 - **Análisis Financiero:** Explicación donde se determine la rentabilidad económica del proyecto. Como mínimo por el método del el Período de Recuperación de la Inversión y de ser necesario, usando los métodos del Valor Presente Neto y la Tasa Interna de Retorno.

10.2.6 Medidas de ahorro de energía complementarias

Además de las medidas de ahorro de energía determinadas en las secciones anteriores, existen otro tipo de medidas de ahorro, que resultan una vez realizadas las acciones recomendadas en los proyectos de eficiencia física e hidráulica y que son las siguientes:

10.2.6.1 Medidas resultantes de la optimización de la operación hidráulica

El resumen de este tipo de medidas de ahorro se presenta en la tabla 67 y en el capítulo 6 del manual “Proyectos de Eficiencia Integral”, donde se describen estas medidas y su método para determinarlas y evaluarlas.

Aspecto	Medida genérica	Medida específica
Optimización integral de la operación hidráulica	Redistribución volumétrica equilibrada Macro Sectorización	<ul style="list-style-type: none"> • Operar solamente las bombas y las horas estrictamente necesarias
	Programa de recuperación de caudales	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir al mínimo el caudal requerido y por ende la potencia de bombeo

	Control de presión y gasto en la redes Variadores de frecuencia Válvulas hidráulicas autocontroladas	<ul style="list-style-type: none"> • Operar fuera de hora punta sin afectar la continuidad del servicio • Uso óptimo el uso de variadores de frecuencia • Optimizar la eficiencia electromecánica sin arrastrar ineficiencias en la carga actual
--	--	---

TABLA 67 MEDIDAS DE AHORRO DE ENERGÍA RESULTANTES DE LA OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA

10.2.6.2 *Medidas resultantes del ahorro de agua y optimización de procesos del lado de la demanda y el saneamiento*

Estas medidas se indican en la tabla 68; sin embargo, no se describen a detalle debido a que no forman parte del alcance de este manual.

Aspecto	Medida genérica	Medida específica
Sistemas de Saneamiento y Consumo Final	Medidas de ahorro en los sistemas de saneamiento municipales y privados	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologías de bajo consumo en plantas de tratamiento de aguas residuales • Reciclaje de agua tratada • Generación de energía con el biogás generado en digestores anaerobios en caso de ser rentable
	Administración de la demanda final Ahorro de agua y su consecuente ahorro de energía en los sistemas de bombeo	<ul style="list-style-type: none"> • Utilización de accesorios ahorradores de agua domésticos y comerciales • Captación y reciclaje de agua de lluvia

TABLA 68 MEDIDAS DE AHORRO DE ENERGÍA POR AHORRO DE AGUA DEL LADO DE LA DEMANDA Y SANEAMIENTO

Capítulo 9

Indicadores de eficiencia

11 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 en el incremento de la eficiencia de un organismo operador, y es un cociente que es obtenido de la información que se maneja o se registra por alguna actividad. Cada indicador expresa el nivel de la actividad en una determinada área durante un determinado período de tiempo, permitiendo una comparación clara con los objetivos definidos y simplificando de esta manera un análisis de por sí complejo.

En los abastecimientos de agua potable, la evaluación y 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 una monitorización más fácil de los resultados del funcionamiento;
- Facilitan información clave al abastecimiento, permitiendo un fortalecimiento del enfoque pro-activo de la gestión, en contra del enfoque reactivo más tradicional, que normalmente confía en funcionamientos aparentes 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 abastecimientos 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 abastecimientos implementar rutinas de medida de la eficiencia, ya sea internas para comparar diversas regiones geográficas, o externas para compararse con otros abastecimientos; este tipo de prácticas crea una competición saludable que de manera natural promueve la mejora de las actuaciones;
- 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.

En la literatura técnica³⁵ se encuentran reportados varios modelos de indicadores, que han sido estructurados e implantados con diferentes fines. Al respecto, 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.

La eficiencia en el escenario de la ingeniería de producción y distribución, particularmente en lo que concierne a las eficiencia física, hidráulica y energética, de los sistemas de abastecimiento de agua potable se recomienda utilizar los siguientes indicadores de evaluación, los cuales han sido seleccionados con base en la experiencia, como los representativos del proceso de eficiencia integral:

35 Helena Alegre, 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.

11.1 Indicador Energético IE, (Kwh/m³)

a) Cálculo

Representa la relación exacta entre 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 el capítulo 8.1.2 del presente manual 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. Los consumos en kilowatts- hora de cada equipo de bombeo del sistema se suman en un año. 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.

$$IE = \frac{\text{Energía total consumida por equipos (Kwh/año)}}{\text{Volumen total de agua producida en captaciones (m³/año)}}$$

ECUACIÓN 96

b) Meta

No existe un indicador de la media nacional, puesto que depende en gran medida del tipo de captaciones de agua 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 índice; de igual forma sistemas con muchas fugas en la red, harán que se incremente el volumen de agua suministrada, y aumentando 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.

11.2 Indicador de Costo Unitario de Energía CUE, (\$/kWh)

a) Cálculo

Representa el costo específico por unidad de energía consumida, el cual depende de varios factores como el tipo de tarifa eléctrica contratada, el 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 que de potencia de la instalación. Este indicador se calcula en base a la estadística de consumo y facturación energética anual recopilada en el organismo operador así como la producción anual de agua potable.

$$CUE = \frac{\text{Importe de facturación eléctrica (\$/año)}}{\text{energía total consumida (Kwh/año)}}$$

Ecuación

b) Meta

Al igual que el indicador anterior, no existe un valor medio en el país. La meta del índice corresponde a cada organismo operador fijarla en función de su infraestructura electromecánica y los costos respectivos.

11.3 Indicador de eficiencia física, IEF, (%)

a) Cálculo

Este indicador permite identificar las pérdidas de agua en la red de distribución de un sistema de agua potable, principalmente.

El índice de eficiencia física se calcula en porcentaje, dividiendo el valor del volumen de agua consumida por los usuarios, entre el volumen de agua producida en el sistema de agua potable. 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 en México se puede utilizar el valor del consumo facturado como una aproximación, para calcular el indicador de eficiencia física, en tanto se obtienen los errores mencionados.

$$\text{Eficiencia física (\%)} = \frac{\text{Volumen de agua consumida (m}^3/\text{tiempo)}}{\text{Volumen de agua suministrada (m}^3/\text{tiempo)}} \times 100$$

ECUACIÓN 97

b) Meta

En México se ha estimado que un valor de la eficiencia física del 80% es un valor bastante aceptable y alcanzable, no obstante en algunos países se han logrado valores inferiores al 15%. Valores inferiores al 80% reflejan oportunidades de ahorro de agua importantes para el organismo operador y en la conservación de las fuentes de abastecimiento.

11.4 Dotación promedio por habitante, Dp, (Lt/hab/día)

a) Cálculo

Indica el nivel de dotación comparativa respecto a los estándares de consumo por parte de los usuarios finales. Se calcula dividiendo el consumo diario total de usuarios, más las respectivas fugas de agua, dividido entre el número total de habitantes servidos.

$$\text{Dotación}_{\text{promedio}} = \frac{V_{\text{volumen suministrado}} (\text{m}^3/\text{año})}{N_{\text{habitantes servidos}} * 365} * 1000$$

Ecuación

b) Meta

La dotación promedio de una localidad incluye el consumo doméstico y las partes proporcionales a los usos no-doméstico y fugas, que les corresponderían hipotéticamente a los habitantes de una localidad. En México el consumo doméstico se recomienda estimarlo con base en el tipo de clima y en la distribución porcentual de las clases socioeconómicas existentes en una localidad. De igual manera, el valor de la dotación dependerá de otros factores importantes como el desarrollo comercial, industrial y hotelero, y en buena medida al nivel existente de fugas que prevalezcan en la red de tuberías. No obstante, lo antes mencionado, se estima que un valor medio nacional de dotación es adecuado si es del orden de los 220 L/habitante/día.

11.5 Indicador de continuidad en el servicio, ICS, (Horas)

a) Cálculo

Indica el nivel de tandeos y el potencial de mejora del servicio, se determina como la división de las horas de servicio continua, entre las horas naturales. Su valor se determina con la ecuación 49 descrita en el capítulo 9.1.1.3 de este manual.

b) Meta

Todos los sistemas de agua potable deberán cumplir con un promedio de 24 horas de servicio diariamente, 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.

Capítulo 10

Anexos

12 ANEXOS

12.1 Anexo A. Formatos para recopilación de información y datos

FORMATO A.1) 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	Mzo	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

FORMATO A.2) 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 (m ³ x 1000)	Concesión (sí/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/cm ²)	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 (m ³)	Edad (años)	Estado físico (% bueno)

Red de distribución (Longitud en kilómetros)							
Diámetro (pulgadas)	Materiales						Total
	Fierro fundido	Fierro galvanizado	Asbesto-cemento	PVC	PEAD	otros	
2							
2 ½							
3							
4							

6							
8							
10							
12							
14							
16							
18							
20							
24							
30							
TOTAL							
Edad de la red (% longitud)	0 a 5 años	5.1 a 10 años	10.1 a 20 años	Más de 20 años			
Estado 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	
½						
¾						
1						
1 ½						
2						
TOTAL						

FORMATO A.3) 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 (m3x1000):	
Distribución temporal de producción de agua (Últimos 12 meses)		
Mes/año	Caudal (L/s)	Volumen Producido (m3x 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 (%)					

FORMATO A.4) 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		

FORMATO A.5) 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 (Ps)	
Pérdidas en conducción (Pc)	
Pérdidas en Potabilización (Pp)	
Pérdidas en distribución (Pd)	

FORMATO A.6) INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA	CONTROL DE FUGAS
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 (m3x1000)	Lugar	Porcentaje (%)
			Red primaria	
			Red secundaria	
			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		

Causas 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)

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			

FORMATO A.7) SISTEMA COMERCIAL	CONSUMO DE AGUA
Los datos presentados aquí deben provenir de 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 rangos de consumo (promedio mensual)				
Rango de consumo (m3/toma/mes)	Cantidad de conexiones		Volúmenes (m3x1000)	
	Número	Porcentaje	Número	Porcentaje
0 a 10				
10.1 a 15				
15.1 a 20				
20.1 a 30				
31,1 a 50				
50.1 a 100				
100.1 a 200				
200.1. a 500				
500.1 a 1000				
más de 1000				
TOTAL				

FORMATO A.8) SISTEMA COMERCIAL	MICROMEDICIÓN
Micromedidores instalados	

Capacidad (m3/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			
Micromedidores existentes	$C_{\text{micromedición}} = \frac{\text{Micromedidores instalados}}{\text{Número de viviendas}} \times 100$	Micromedidores funcionando	$C_{\text{funcionando}} = \frac{\text{Micromedidores funcionando}}{\text{Micromedidores instalados}} \times 100$

Mantenimiento de micromedición			
Sustitución de micromedidores	Sistemática: Esporádica: No se hace:	Método de detección de fallas	Reporte de lecturistas: Aviso de usuarios: Inspección continua: Otros:

Distribución de consumos en micromedidores			
Tamaño del micromedidor (pulgadas)	Número de micromedidores	Consumo anual (m3)	Porcentaje de consumo (%)
5/8			
3/4			
1			
1 1/2			
2			
3			
4			

6			
Sin micromedidor			
TOTAL			

Mes	Tipo de uso			Total (m3)
	Doméstico (m3)	Comercial (m3)	Industrial (m3)	
Enero				
Febrero				
Marzo				
...				
Diciembre				
TOTAL				

Mes	Número de usuarios por Nivel socioeconómico		
	RESIDENCIAL (m3)	MEDIO (m3)	POPULAR (m3)
Enero			
Febrero			
Marzo			
...			
Diciembre			
TOTAL			

TABLA 69 A.1. FORMATO DE CAMPO PARA LEVANTAMIENTO FÍSICO DE INSPECCIÓN Y AFORO DE FUGAS EN TOMAS DOMICILIARIAS

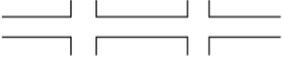
1. DATOS GENERALES DE LA ACOMETIDA Nombre del usuario:.....Domicilio:..... Sector:.....Ciudad:.....Fecha:.....Hora:.....No. de acometida:.....							7. LUGAR DE LA FUGA <table border="1"> <tr> <th>Abrazadera</th> <th>Niple o cople</th> <th>Codo</th> <th>Tubería flexible</th> <th>Tubería rígida</th> <th>Tuerca unión del medidor</th> <th>Llave de paso</th> <th>Otro</th> </tr> <tr> <td> </td> </tr> </table>  SEÑALAR EL LUGAR DE LA FUGA							Abrazadera	Niple o cople	Codo	Tubería flexible	Tubería rígida	Tuerca unión del medidor	Llave de paso	Otro																																				
Abrazadera	Niple o cople	Codo	Tubería flexible	Tubería rígida	Tuerca unión del medidor	Llave de paso	Otro																																																		
2. PRESIONES (kg/cm²) <table border="1"> <tr> <th>Enfrente</th> <th>Lado</th> <th>Domicilio</th> <th>Lado</th> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>							Enfrente	Lado	Domicilio	Lado					8. TIPO DE FUGA <table border="1"> <tr> <th>Rajadura</th> <th>Perforación</th> <th>Rotura</th> <th>Corte</th> <th>Rosca floja</th> <th>Otro (especificar)</th> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>							Rajadura	Perforación	Rotura	Corte	Rosca floja	Otro (especificar)																														
Enfrente	Lado	Domicilio	Lado																																																						
Rajadura	Perforación	Rotura	Corte	Rosca floja	Otro (especificar)																																																				
3. MATERIAL DE LA ACOMETIDA INSPECCIONADA <table border="1"> <tr> <th colspan="5">Tipo de tubería de la acometida</th> </tr> <tr> <th>Fierro galvanizado</th> <th>Policetileno</th> <th>Cobre</th> <th>Poliducto</th> <th>PVC</th> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>							Tipo de tubería de la acometida					Fierro galvanizado	Policetileno	Cobre	Poliducto	PVC						9. AFORO DE FUGA <table border="1"> <tr> <th>No. de medición</th> <th>Volumen (ml) y Tiempo (s)</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td> </td> </tr> <tr> <td>2</td> <td> </td> </tr> <tr> <td>3</td> <td> </td> </tr> <tr> <td>PROMEDIO</td> <td> </td> </tr> </table>							No. de medición	Volumen (ml) y Tiempo (s)	1		2		3		PROMEDIO																				
Tipo de tubería de la acometida																																																									
Fierro galvanizado	Policetileno	Cobre	Poliducto	PVC																																																					
No. de medición	Volumen (ml) y Tiempo (s)																																																								
1																																																									
2																																																									
3																																																									
PROMEDIO																																																									
4. UBICACIÓN DEL DOMICILIO (CROQUIS) 							10. REPARACION: HORA DE INICIO HORA DE TERMINACION.....																																																		
5. EXCAVACION: Profundidad respecto al nivel de la calle:.....cm <table border="1"> <tr> <th colspan="5">Tipo de pavimento a lo largo de la acometida</th> <th colspan="2">Estado del pavimento</th> </tr> <tr> <th>Concreto</th> <th>Asfalto</th> <th>Terracería</th> <th>Empedrado</th> <th>Otro</th> <th>Bueno</th> <th>Deteriorado</th> </tr> <tr> <td> </td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <th colspan="7">MATERIAL DE EXCAVACION</th> </tr> <tr> <th>Arena</th> <th>Grava</th> <th>Tezontle</th> <th>Tierra</th> <th>Areilla</th> <th>Roca</th> <th>Piedras</th> <th>Otros</th> </tr> <tr> <td> </td> </tr> </table>							Tipo de pavimento a lo largo de la acometida					Estado del pavimento		Concreto	Asfalto	Terracería	Empedrado	Otro	Bueno	Deteriorado								MATERIAL DE EXCAVACION							Arena	Grava	Tezontle	Tierra	Areilla	Roca	Piedras	Otros									11. No. DE PERSONAS DE LA BRIGADA:.....EQUIPO DE MEDICIÓN UTILIZADO:						
Tipo de pavimento a lo largo de la acometida					Estado del pavimento																																																				
Concreto	Asfalto	Terracería	Empedrado	Otro	Bueno	Deteriorado																																																			
MATERIAL DE EXCAVACION																																																									
Arena	Grava	Tezontle	Tierra	Areilla	Roca	Piedras	Otros																																																		
6. MATERIAL DE LA TUBERIA DE LA ACOMETIDA CON FUGA. Diámetro:.....pulgadas <table border="1"> <tr> <th colspan="5">Tipo de tubería de la toma con fuga</th> <th colspan="2">Estado</th> </tr> <tr> <th>Fierro galvanizado</th> <th>Policetileno</th> <th>Cobre</th> <th>Poliducto</th> <th>PVC</th> <th>Bien</th> <th>Mal</th> </tr> <tr> <td> </td> </tr> </table>							Tipo de tubería de la toma con fuga					Estado		Fierro galvanizado	Policetileno	Cobre	Poliducto	PVC	Bien	Mal								11. No. DE PERSONAS DE LA BRIGADA:.....EQUIPO DE MEDICIÓN UTILIZADO:																													
Tipo de tubería de la toma con fuga					Estado																																																				
Fierro galvanizado	Policetileno	Cobre	Poliducto	PVC	Bien	Mal																																																			

TABLA 70 A.2. FORMATO TÍPICO PARA ENCUESTAS DE VERIFICACIÓN DE TOMAS DOMICILIARIAS

Cuenta	Giro	Nombre del usuario/dirección	Número Catastral	SOBRE EL PREDIO			SOBRE LA TOMA										
				Estado	Cisterna	Tomas o Viviendas	Folio SAPAC	Uso	Giro	Posición	Longitud	Fuga	Ø				
ACTUALIZACIÓN DE PADRON DE USUARIOS																	

Tabla 71 A.2. FORMATO TÍPICO PARA ENCUESTAS EN LA VERIFICACIÓN DE TOMAS DOMICILIARIAS (CONTINUACIÓN)

SOBRE EL MEDIDOR			DRENAJE	OPINIÓN DEL USUARIO					
	CICASA	Buen Estado	Rod	Continuo	Excelente	Siempre Sube al Tinaco	Excelente		
	Azteca	Lectura Borrosa	Fosa	Unas Horas por día	Buena	No-Siempre Sube al Tinaco	Buena		
	Shumberger	Lectura No-Visible	Letrín	Cada 3 días	Regular	Solo 2° Nivel	Regular		
	Elster	No Funciona	Derrama	Cada semana	Mala	Solo 1er Nivel	Malo	Sector 07 - Ruta 05	
	Otro	No Funciona	Abierto	Menos de 4 días por mes	Muy Mala	Solo a Sistema	Muy Mala		
Número de Medidor	Marca de Medidor	Estado de Medidor	Derrama:	Frecuencia del servicio	Calidad del Agua	Presión de Llegada	Opinión del Servicio	Observaciones	Firma del Encuestado

12.2 Anexo B. Propiedades hidráulicas y medición

TABLA 72 B.1. RUGOSIDAD EN TUBERÍAS NUEVAS

MATERIAL DE LA TUBERÍA	RUGOSIDAD ε en mm
Vidrio, cobre, plástico, hule	0.0015
Fierro fundido nuevo	0.005 a 0.01
Fierro fundido semioxidado	0.010 a 0.015
Fierro fundido oxidado	0.015 a 0.030
Cemento liso	0.003 a 0.008
Acero	0.04 a 0.10
Asbesto cemento	0.025
Concreto	0.16 a 2.0

TABLA 73 B.2. FACTORES DE INCREMENTO DE F POR ENVEJECIMIENTO DE TUBERÍAS

Material de la tubería	Factor de incremento del coeficiente de cortante f por envejecimiento
PVC	1.2
Acero galvanizado	1.85
Acero	1.85
Hierro dúctil	2.0
Polietileno de alta densidad	1.2

TABLA 74 B.3. VISCOSIDAD CINEMÁTICA DEL AGUA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

Temperatura (°C)	Viscosidad Cinemática		Temperatura (°C)	Viscosidad Cinemática	
	(Stokes)	(m ² /s)		(Stokes)	(m ² /s)
0	0.01793	1.793 E-6	26	0.00873	0.873 E-6
2	0.01674	1.674 E-6	28	0.00836	0.836 E-6
4	0.01568	1.568 E-6	30	0.00802	0.802 E-6
6	0.01474	1.474 E-6	32	0.00769	0.769 E-6
8	0.01386	1.386 E-6	34	0.00738	0.738 E-6
10	0.01307	1.307 E-6	36	0.00711	0.711 E-6
12	0.01236	1.236 E-6	38	0.00684	0.684 E-6

14	0.01170	1.170 E-6	40	0.00658	0.658 E-6
16	0.01109	1.109 E-6	50	0.00547	0.547 E-6
18	0.01055	1.055 E-6	60	0.00468	0.468 E-6
20	0.01004	1.004 E-6	70	0.00404	0.404 E-6
22	0.00957	0.957 E-6	80	0.00353	0.353 E-6
24	0.00914	0.914 E-6	90	0.00313	0.313 E-6

Ilustración 100 B.1. Curva típica de exactitud de medidores de agua potable

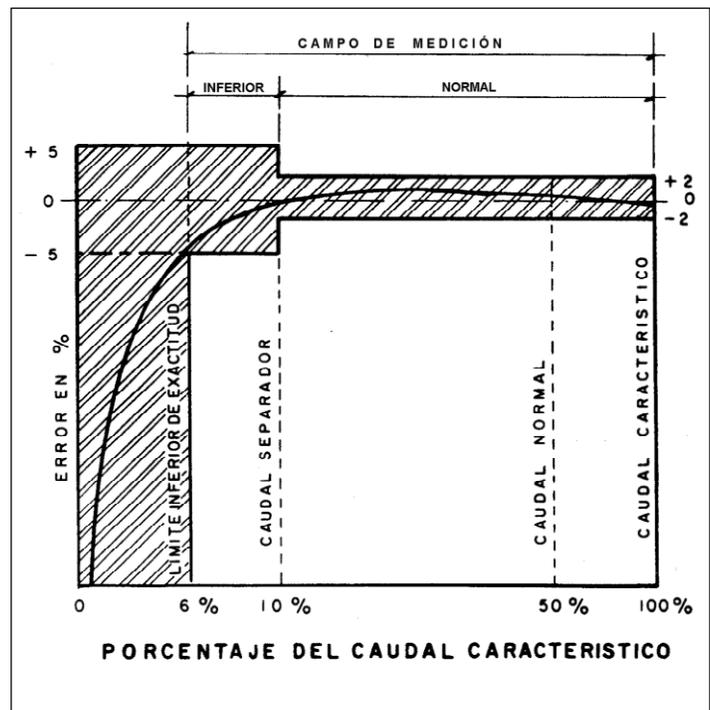
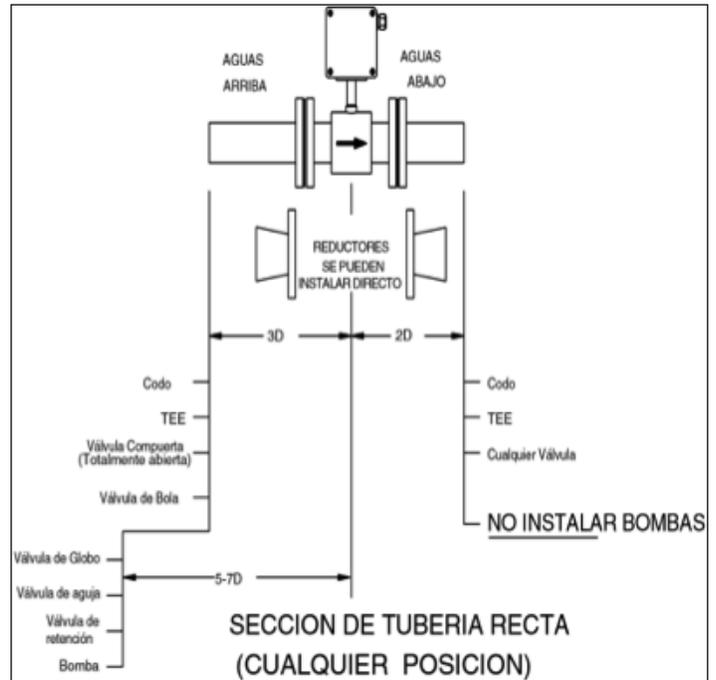


ILUSTRACIÓN 101 B.2. DISTANCIAS PARA UBICAR UN MEDIDOR ELECTROMAGNÉTICO Y OBTENER MEDICIONES CONFIABLES



12.3 Anexo C. Formato del balance de agua

	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 (+ó-)	
2B	Cambio en reservas y tanques de almacenamiento (+ó-)	
2C	Otras contribuciones o pérdidas (+ó-)	
3	Total de ajustes en el suministro total de 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 MEDIDO 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 (+ó-)	
15	Error en medidores comerciales, industriales y especiales (+ó-)	
16	Error de defase en período de lectura del medidor (+ó-)	
17	Usos clandestinos regularizados	
18	Fugas reparadas (eliminadas)	
19	Errores en cuota fija (+ó-)	
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	
TAREA 7. Estimación de pérdidas reales potenciales		
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)	

12.4 Anexo D. Estructura tarifaria



ILUSTRACIÓN 102 D.1.
TARIFA HM CENTRAL,
NORESTE, NORTE Y SUR

VERANO	DIA	HORARIO			
Del 1° domingo de Abril, al sábado anterior al último domingo de Octubre.	Lunes a Viernes	0	6	20	22
	Sábado	0	7		
	Domingo y Festivos	0		19	
FUERA DE VERANO	DIA	HORARIO			
Del último Domingo de Octubre, al sábado anterior al primer domingo de Abril	Lunes a Viernes	0	6	18	22
	Sábado	0	8	19	21
	Domingo y Festivos	0		18	

©BASE. ©INTERMEDIA. ©PUNTA.

Tarifa 6 (2008 - 2009)

Servicio para bombeo de aguas potables o negras, de servicio público

1. Aplicación: Esta tarifa se aplicará al suministro de energía eléctrica para servicio público de bombeo de aguas potables o negras
2. Cuotas aplicables en el mes de Agosto del 2009.
 - a. Cargo fijo, independiente de la energía consumida - \$ 232.33
 - b. Cargo adicional por la energía consumida - \$ 1.277 por cada kilowatt-hora.
3. Mínimo mensual: Cuando el usuario no haga uso del servicio, cubrirá como mínimo el cargo a que se refiere el inciso 2.1.
4. Demanda por contratar: La demanda por contratar la fijará inicialmente el usuario; su valor no será menor de 60% de la carga total conectada ni menor de la capacidad del mayor motor o aparato instalado. Cualquier fracción de kilowatt se tomará como kilowatt completo.

5. Depósito de garantía: Será de 4 veces el mínimo mensual aplicable.
6. Servicio en tarifa de uso general: Los usuarios podrán solicitar su incorporación a la tarifa de uso general que corresponda, cuando las características de sus instalaciones y las del suministrador lo permitan.

Tarifa O-M (2008 - 2009)

Tarifa ordinaria para servicio general en media tensión, con demanda menor a 100 kW.

1. Aplicación: Esta tarifa se aplicará a los servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en media tensión, con una demanda menor a 100 kW
2. Cuotas aplicables en el mes de Agosto del 2009. Se aplicarán los siguientes cargos por la demanda máxima medida y por la energía consumida:

Región	Cargo por kilowatt de demanda máxima medida	Cargo por kilowatt - hora de energía consumida
Baja California	\$ 124.22	\$ 1.028
Baja California Sur	\$ 137.58	\$ 1.386
Central	\$ 140.54	\$ 1.028
Noreste	\$ 129.23	\$ 0.960
Noroeste	\$ 131.92	\$ 0.952
Norte	\$ 129.74	\$ 0.960
Peninsular	\$ 145.09	\$ 0.981
Sur	\$ 140.54	\$ 0.994

3. Mínimo mensual: El importe que resulta de aplicar 10 veces el cargo por kilowatt de demanda máxima medida.
4. Demanda contratada: La demanda contratada la fijará inicialmente el usuario; su valor no será menor del 60% de la carga total conectada, ni menor de 10 kilowatts o la capacidad del mayor motor o aparato instalado. En el caso de que el 60% de la carga total conectada exceda la capacidad de la subestación del usuario, sólo se tomará como demanda contratada la capacidad de dicha subestación a un factor de 90%.
5. Temporadas de verano y fuera de verano: Para la aplicación de las cuotas en las regiones Baja California y Baja California Sur se definen las siguientes temporadas:

Verano:

Región Baja California: del 1 de mayo, al sábado anterior al último domingo de octubre.

Región Baja California Sur: del primer domingo de abril, al sábado anterior al último domingo de octubre.

Fuera de verano:

Región Baja California: del último domingo de octubre al 30 de abril.

Región Baja California Sur: del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril.

6. Demanda máxima medida: La demanda máxima medida se determinará mensualmente por medio de instrumentos de medición, que indican la demanda media en kilowatts, durante cualquier intervalo de

15 minutos, en el cual el consumo de energía eléctrica sea mayor que en cualquier otro intervalo de 15 minutos en el periodo de facturación.

- Cualquier fracción de kilowatt de demanda máxima medida se tomará como kilowatt completo.
 - Cuando la demanda máxima medida exceda de 100 kilowatts, el usuario deberá solicitar al suministrador su incorporación a la tarifa H-M. De no hacerlo, al tercer mes consecutivo en que exceda la demanda de 100 kilowatts, será reclasificado por el suministrador en la tarifa H-M, notificando al usuario.
7. Depósito de garantía: Resulta de aplicar 2 veces el importe del cargo por demanda máxima medida a la demanda contratada.

Tarifa H-M (2008 - 2009)

Tarifa horaria para servicio general en media tensión, con demanda de 100 kW o más

1.- Aplicación

Esta tarifa se aplicará a los servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en media tensión, con una demanda de 100 kilowatts o más.

2.- Cuotas aplicables en el mes de Agosto del 2009

Se aplicarán los siguientes cargos por la demanda facturable, por la energía de punta, por la energía intermedia y por la energía de base.

Región	Cargo por kilowatt de demanda facturable	Cargo por kilowatt - hora de energía de punta	Cargo por kilowatt - hora de energía intermedia	Cargo por kilowatt - hora de energía de base
Baja California	\$ 221.11	\$ 1.6875	\$ 0.7973	\$ 0.6266
Baja California Sur	\$ 212.52	\$ 1.3540	\$ 1.1066	\$ 0.7830
Central	\$ 153.24	\$ 1.6176	\$ 0.8831	\$ 0.7381
Noreste	\$ 140.90	\$ 1.4940	\$ 0.8199	\$ 0.6716
Noroeste	\$ 143.89	\$ 1.5026	\$ 0.8137	\$ 0.6819
Norte	\$ 141.58	\$ 1.5046	\$ 0.8279	\$ 0.6736
Peninsular	\$ 158.34	\$ 1.5825	\$ 0.8295	\$ 0.6834
Sur	\$ 153.24	\$ 1.5842	\$ 0.8438	\$ 0.7020

--	--	--	--	--

3.- Mínimo mensual

El importe que resulta de aplicar el cargo por kilowatt de demanda facturable al 10% de la demanda contratada.

4.- Demanda contratada

La demanda contratada la fijará inicialmente el usuario; su valor no será menor del 60% de la carga total conectada, ni menor de 100 kilowatts o la capacidad del mayor motor o aparato instalado.

En el caso de que el 60% de la carga total conectada exceda la capacidad de la subestación del usuario, sólo se tomará como demanda contratada la capacidad de dicha subestación a un factor de 90%.

5.- Horario

Para los efectos de la aplicación de esta tarifa, se utilizarán los horarios locales oficialmente establecidos. Por días festivos se entenderán aquellos de descanso obligatorio, establecidos en el artículo 74 de la Ley Federal del Trabajo, a excepción de la fracción IX, así como los que se establezcan por Acuerdo Presidencial.

6.- Periodos de punta, intermedio y base

Estos periodos se definen en cada una de las regiones tarifarias para distintas temporadas del año, como se describe a continuación.

Región Baja California

Del 1º de mayo al sábado anterior al último domingo de octubre

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
-------------------------	-------------	-------------------	--------------

lunes a viernes		0:00 - 14:00 18:00 - 24:00	14:00 - 18:00
sábado		0:00 - 24:00	
domingo y festivo		0:00 - 24:00	

Del último domingo de octubre al 30 de abril

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 17:00 22:00 - 24:00	17:00 - 22:00	
sábado	0:00 - 18:00 21:00 - 24:00	18:00 - 21:00	
domingo y festivo	0:00 - 24:00		

Región Baja California Sur

Del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
-------------------------	-------------	-------------------	--------------

lunes a viernes		0:00 - 12:00 22:00 - 24:00	12:00 - 22:00
sábado		0:00 - 19:00 22:00 - 24:00	19:00 - 22:00
domingo y festivo		0:00 - 24:00	

Del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 18:00 22:00 - 24:00	18:00 - 22:00	
sábado	0:00 - 18:00 21:00 - 24:00	18:00 - 21:00	
domingo y festivo	0:00 - 19:00 21:00 - 24:00	19:00 - 21:00	

Regiones Central, Noreste, Noroeste, Norte, Peninsular y Sur

Del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 20:00 22:00 - 24:00	20:00 - 22:00

sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
domingo y festivo	0:00 - 19:00	19:00 - 24:00	

Del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 18:00 22:00 - 24:00	18:00 - 22:00
sábado	0:00 - 8:00	8:00 - 19:00 21:00 - 24:00	19:00 - 21:00
domingo y festivo	0:00 - 18:00	18:00 - 24:00	

7.- Demanda facturable

La demanda facturable se define como se establece a continuación:

$$DF = DP + FRI \times \max (DI - DP, 0) + FRB \times \max (DB - DPI, 0)$$

Donde:

DP es la demanda máxima medida en el periodo de punta

DI es la demanda máxima medida en el periodo intermedio

DB es la demanda máxima medida en el periodo de base

DPI es la demanda máxima medida en los periodos de punta e intermedio

FRI y FRB son factores de reducción que tendrán los siguientes valores, dependiendo de la región tarifaria:

Región	FRI	FRB
Baja California	0.141	0.070

Baja California Sur	0.195	0.097
Central	0.300	0.150
Noreste	0.300	0.150
Noroeste	0.300	0.150
Norte	0.300	0.150
Peninsular	0.300	0.150
Sur	0.300	0.150

En las fórmulas que definen las demandas facturables, el símbolo "max" significa máximo, es decir, que cuando la diferencia de demandas entre paréntesis sea negativa, ésta tomará el valor cero.

Las demandas máximas medidas en los distintos periodos, se determinarán mensualmente por medio de instrumentos de medición, que indican la demanda media en kilowatts, durante cualquier intervalo de 15 minutos del periodo en el cual el consumo de energía eléctrica sea mayor que en cualquier otro intervalo de 15 minutos en el periodo correspondiente.

- Cualquier fracción de kilowatt de demanda facturable se tomará como kilowatt completo.
- Cuando el usuario mantenga durante 12 meses consecutivos valores de DP, DI y DB inferiores a 100 kilowatts, podrá solicitar al suministrador su incorporación a la tarifa O-M.

8.- Energía de punta, intermedia y de base

Energía de punta es la energía consumida durante el periodo de punta.

Energía intermedia es la energía consumida durante el periodo intermedio.

Energía de base es la energía consumida durante el periodo de base.

9.- Depósito de garantía

Será de 2 veces el importe que resulte de aplicar el cargo por demanda facturable a la demanda contratada.

ILUSTRACIÓN 103 D.2.
CARGO POR FACTOR
DE POTENCIA MENOR
A 90%

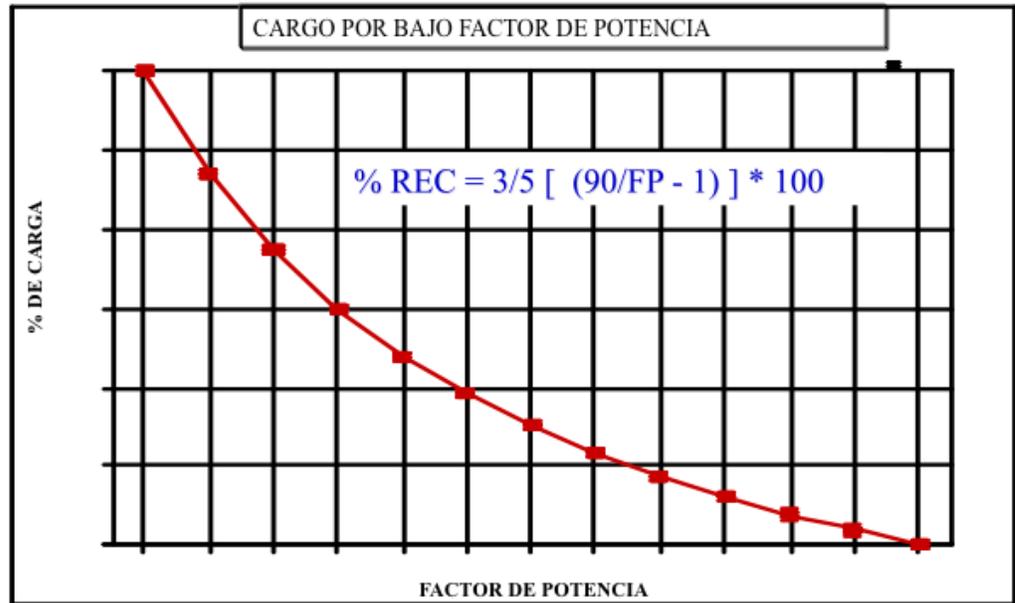


ILUSTRACIÓN 104 D.3.
BONIFICACIÓN POR
ALTO FACTOR DE
POTENCIA, MAYOR AL
90%

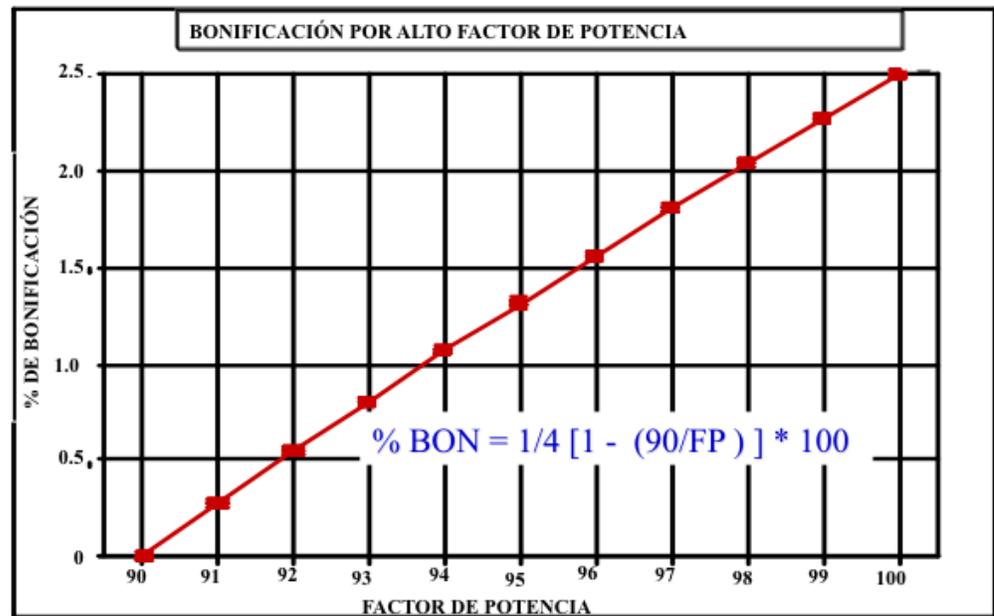


TABLA 75 D.1. FORMATO TÍPICO PARA REGISTRAR LA ESTADÍSTICA DE FACTURACIÓN ELÉCTRICA

Cía. Suministradora: _____		Tarifa: _____					
Tensión de suministro: Volt _____		Número de Servicio: _____					
Historial de Facturación (Tarifas Horarias)							
Mes	Horario de Punta		Horario intermedio		Horario Base		Factor de Potencia
	Demanda (kW)	Consumo (kWh)	Demanda (kW)	Consumo (kWh)	Demanda (kW)	Consumo (kWh)	

12.5 Anexo E. Tablas y gráficas de referencia electromecánica.

12.5.1 Anexo E.1. Tablas y graficas de referencia en el diagnóstico y proyecto de eficiencia energética.

TABLA 76 E.1 PÉRDIDAS EN UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO EN FUNCIÓN DE SU CAPACIDAD NOMINAL

Potencia Nominal (kVA)	Pérdidas en el hierro (P_{Fe})	Pérdidas en el Cobre a Potencia Nominal (P_{Cu})
25	195	670
50	345	810
75	400	1080
100	435	1085
125	480	2350
160	490	2600
200	570	3400
250	675	4230
315	750	5250
400	900	6200

500	1000	8050
630	1250	9000
800	1690	10800
1000	1800	12600
1250	2010	16800
1600	2500	19000
2000	2750	23900
2500	3480	29600
3150	3500	30500
4000	4300	34000
5000	5000	39500
6300	6300	45000
8000	7000	57000
10000	7600	68500

ILUSTRACIÓN 105
 E.1 EFICIENCIA
 TÍPICA VS.
 CURVAS DE
 CARGA PARA
 MOTORES DE
 INDUCCIÓN DE
 JAULA DE
 DISEÑO B, 1800
 RPM

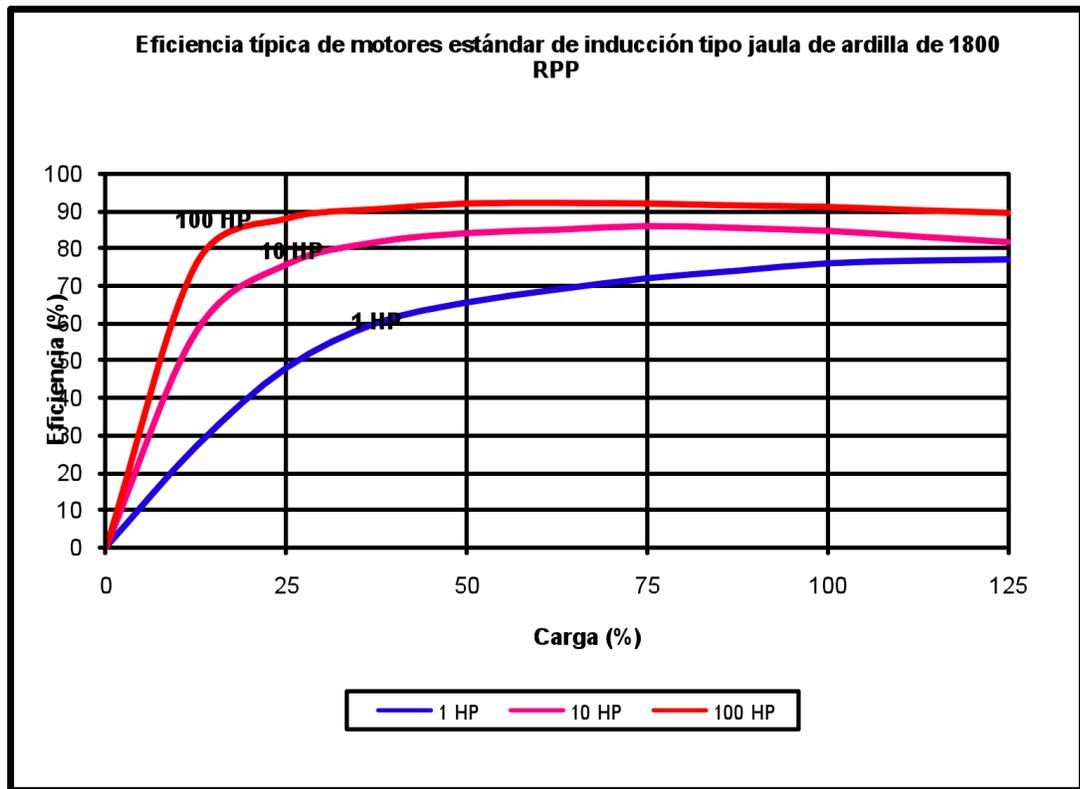


ILUSTRACIÓN 106 E.2
 DEPRECIACIÓN DE LA
 EFICIENCIA DE UN MOTOR
 EN FUNCIÓN DE LA
 DESVIACIÓN DEL VOLTAJE
 RESPECTO AL NOMINAL

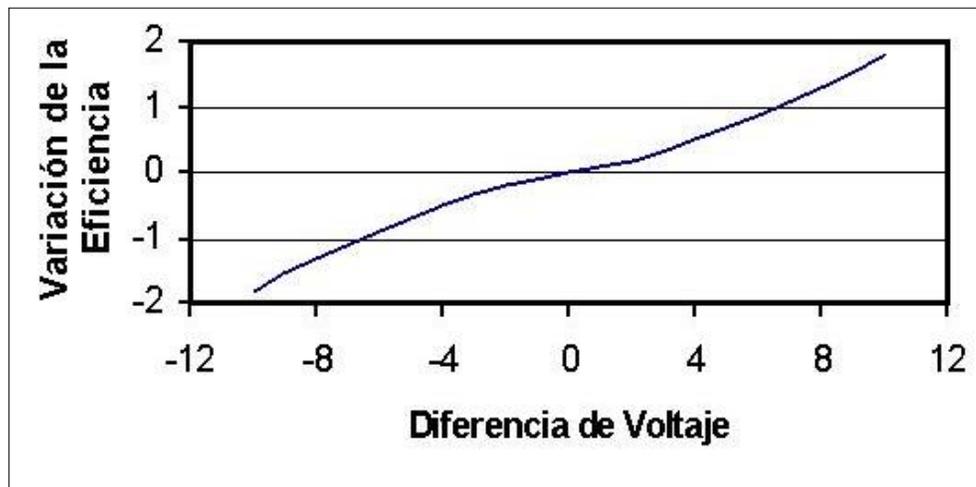


ILUSTRACIÓN 107 E.3
 DEPRECIACIÓN DE LA
 EFICIENCIA DE UN MOTOR EN
 FUNCIÓN DEL DESBALANCE
 DE VOLTAJE

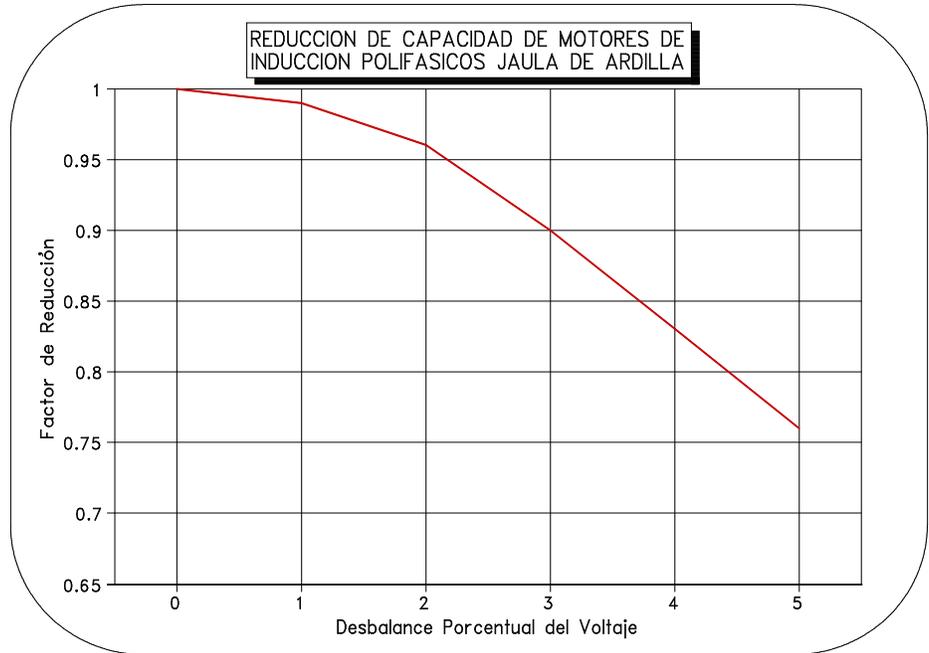


ILUSTRACIÓN 108 E.4
 FACTOR DE POTENCIA EN
 MOTORES DE INDUCCIÓN

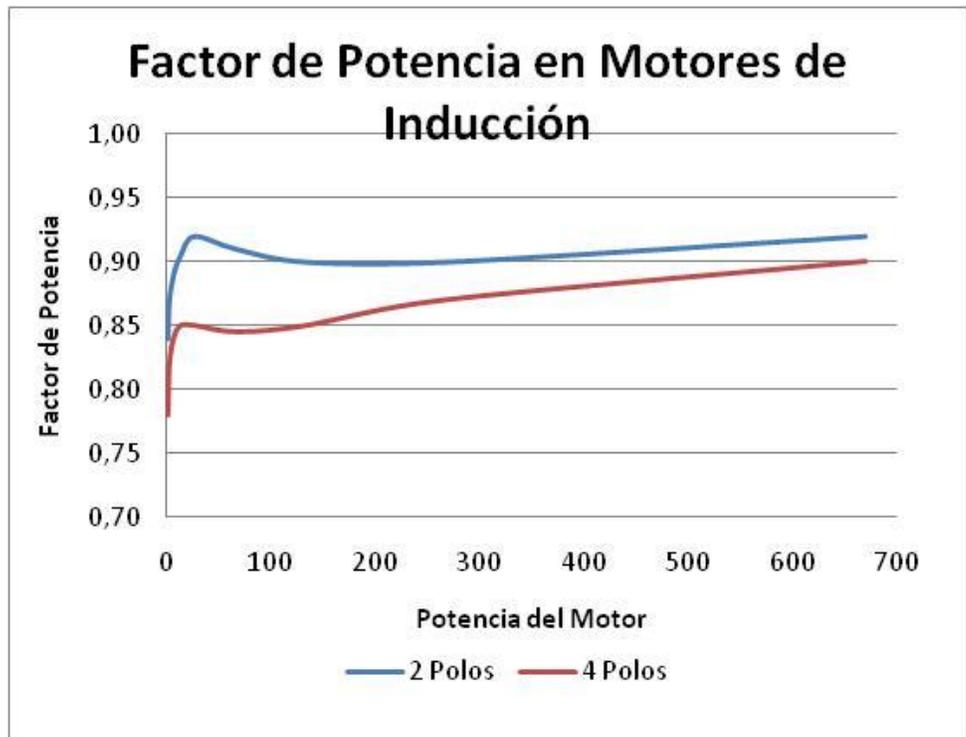
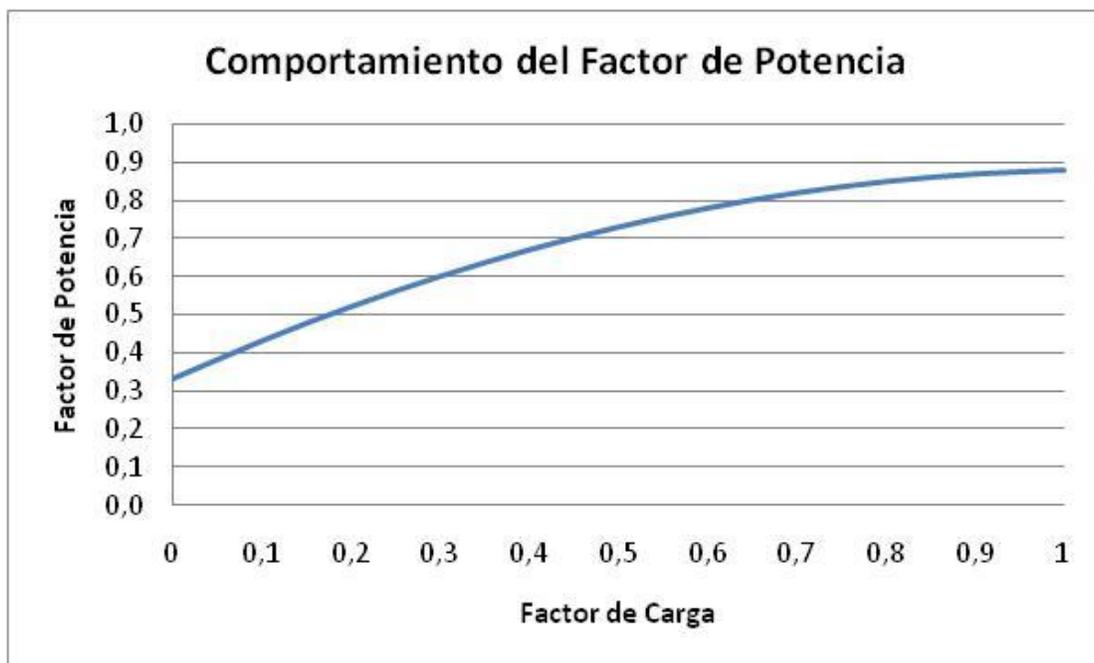


ILUSTRACIÓN 109
E.5 FACTOR DE
POTENCIA
COMO FUNCIÓN
DEL FACTOR DE
CARGA EN UN
MOTOR



12.5.2 Anexo E.2 Cálculos Eléctricos e Hidráulicos

Desbalance de Voltaje (D_{bv})

El desbalance de voltaje se calcula a partir de las mediciones de tensión entre fases, por medio de la ecuación E.1.

$$D_{bv} = \frac{\text{Máximo}[(V_{\max}(V_{A-B}, V_{B-C}, V_{C-A}) - V_{prom}), (V_{prom} - V_{\min}(V_{A-B}, V_{B-C}, V_{C-A}))]}{V_{prom}} * 100$$

ECUACIÓN 98 E1

Donde:

- D_{bv} = Desbalance de voltaje.
- V_{A-B} = Tensión entre las fases A y B.
- V_{B-C} = Tensión entre las fases B y C.
- V_{C-A} = Tensión entre las fases C y A.
- V_{prom} = Tensión promedio entre fases.

Desbalance de Corriente (D_{bi})

$$D_{bv} = \frac{\text{Máximo}[(\text{Max}(I_A, I_B, I_C) - I_{prom}), (I_{prom} - \text{mín}(I_A, I_B, I_C))]}{I_{prom}} * 100$$

ECUACIÓN 99 E2

Donde:

D_{BI} =es el desbalance de corriente.

I_A =es la corriente de la fase A.

I_B =es la corriente de la fase B.

I_C =es la corriente de la fase C.

I_{prom} =es la corriente promedio de las tres fases.

Voltaje de Alimentación Diferente al Nominal (D_{VSN})

El valor de la tensión de alimentación diferente a la nominal, se calcula en términos porcentuales de acuerdo a la ecuación E.3.

$$D_{VSN} = \frac{(V_{prom} - V_{placa})}{V_{placa}} * 100$$

ECUACIÓN 100 E3

Donde:

D_{VSN} =es la diferencia porcentual entre el valor del voltaje de alimentación y el dato de placa del voltaje nominal.

V_{prom} =es el voltaje promedio entre fases.

V_{placa} =es el valor de voltaje nominal de alimentación, indicado en la placa.

Carga de velocidad (H_v)

La carga de velocidad se determina con la ecuación E.4.

$$h_v = \frac{V_{td}^2}{2g}$$

ECUACIÓN 101 E4

Donde:

V_{td} = Es la velocidad del agua en la tubería de descarga, en m/s.

G = Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s².

Pérdidas de carga por cortante en la tubería de succión (h_{fs})

Las pérdidas por el efecto del esfuerzo cortante entre el flujo de agua y las paredes de la tubería de succión, se calcula mediante la expresión de Darcy-Weisbach, indicada en la ecuación E.5.

$$h_{fs} = f \frac{L_{ts}}{D_{ts}} \frac{V_{td}^2}{2g}$$

ECUACIÓN 102 E5

Donde:

f = Es el coeficiente de cortante, determinado con la ecuación de Colebrook White, función del Número de Reynolds y de la rugosidad relativa.

L_{ts} = Longitud de la tubería de succión, en metros.

D_{ts} = Diámetro de la tubería de succión, en metros.

V_{ts} = Es la velocidad del agua en la tubería de succión, en m/s.

g = Es la aceleración de la gravedad, igual a 9.81 m/s².

Ejemplo numérico de evaluación de pérdidas y ahorro de energía eléctrica en un conductor eléctrico

Calcular las pérdidas en un conductor eléctrico que alimenta un motor de 150 Amperes, conectado a un equipo de bombeo sumergible. El calibre del conductor instalado es de $\Delta 1/0$ con 4 hilos a 440 Volts, como indica la NOM 001 ENER 2005. La distancia del cable es de 130 m.

En la tabla E.2 se presenta la caída de voltaje, ΔV y la resistencia R_c en Ohms ocasionada, para diferentes calibres de conductor con la distancia de 130 metros (0.13 km).

TABLA E.2. RESISTENCIA PARA DIFERENTES CALIBRES DE CONDUCTOR Y CAÍDA DE VOLTAJE PARA EL EJEMPLO

Calibre	Resistencia			Δv	
	Ohms/km	Lc (km)	Ohms	Volts	%
1/0	0.3290	0.13	0.04277	6.42	1.46%
2/0	0.2610	0.13	0.03393	5.09	1.16%
3/0	0.2070	0.13	0.02691	4.04	0.92%

4/0	0.1640	0.13	0.02132	3.20	0.73%
250	0.1390	0.13	0.01807	2.71	0.62%
300	0.1157	0.13	0.01504	2.26	0.51%
350	0.0991	0.13	0.01288	1.93	0.44%
400	0.0867	0.13	0.01127	1.69	0.38%
500	0.0695	0.13	0.00904	1.36	0.31%
600	0.0578	0.13	0.00751	1.13	0.26%
750	0.0463	0.13	0.00602	0.90	0.21%

Al seleccionar el valor del calibre 1/0 en la tabla E.2, se obtiene que la caída de voltaje es de 6.42 volts (1.46%) y la resistencia de 0.4277 Ohms. Con estos datos se calculan las pérdidas energéticas, funcionando 6,000 horas al año y un Índice de Costo Energético de 1.4 \$/kWh promedio (ver tabla E.3).

TABLA E.3. CALCULO DE PÉRDIDAS ENERGÉTICAS POR EFECTO JOULE PARA EL EJEMPLO

Parámetro	Valor
Tensión (V_j)	440 Volts
Corriente (I_c)	150 Amperes
Caída de tensión (Δ_j)	6.42 Volts
	1.46 %
Resistencia R_c (ecuación 4.12)	0.0428 Ohms
Pérdidas de energía eléctrica P_j (ecuación 4.11)	963 Watts
	0.963 KW
Horas de operación anual	6,000 horas/año
Pérdidas anuales de energía eléctrica	5,778 Kwh/año
	8,089 \$/año

Sí ahora se selecciona un calibre mayor, por ejemplo el conductor calibre 350, para las mismas 6,000 horas de operación, y se compara con el costo de energía con el conductor original calibre 1/0, el ahorro de energía logrado es el que se muestra en la (ver tabla E.4).

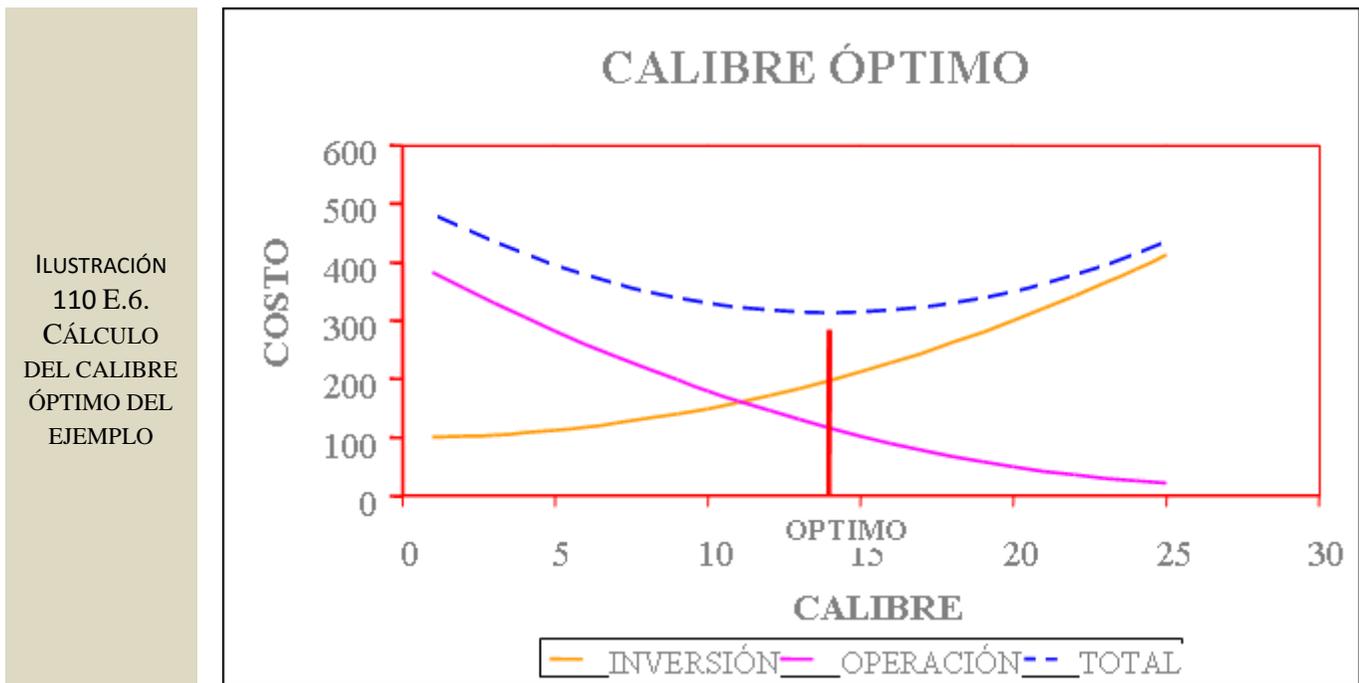
TABLA E.4. CÁLCULO DE AHORROS POR CONDUCTORES ELÉCTRICOS POR COMPARACIÓN EN EL EJEMPLO

Parámetro	Valor que cumple con la Norma	Valor que cumple con la Norma y ahorra energía
Tensión (V_j)	440 Volts	440 Volts

Corriente (I_c)	150 Amperes	150 Amperes
Caída de tensión (Δ_j)	6.42 Volts	1.93 Volts
	1.46 %	0.44 %
Resistencia R_c (ecuación 4.12)	0.0428 Ohms	0.01287 Ohms
Pérdidas de energía eléctrica P_j (ecuación 4.11)	963 Watts	289.6 Watts
	0.963 KW	0.2896 Kw
Horas de operación anual	6,000 horas/año	6,000 horas/año
Pérdidas anuales de energía eléctrica	5,778 Kwh/año	1,737.6 Kwh/año
	8,089 \$/año	2,432.6 \$/año
Ahorro de energía eléctrica	5,657 \$/año	

El último paso en la evaluación del conductor del ejemplo consiste en comparar el ahorro económico resultante con el costo del cambio de conductor para evaluar su rentabilidad.

En caso de que las pérdidas resulten de una magnitud importante durante el DEE, se recomienda aplicar el método de cálculo de equilibrio económico en función de la inversión más rentable cuyo resultado típico se muestra en la figura E.6.



Evaluación de ahorros y costo- beneficio por sustitución de un motor estándar por alta eficiencia

Paso 1.- Calcular el costo anual de la energía consumida por el motor

A partir del número de horas de operación al año del motor y de la potencia demandada por éste, se calcula la energía anual consumida por el motor, mediante la ecuación E.6.

$$E_{cm} = P_e * h_{op}$$

ECUACIÓN 103 E6

Donde:

E_{cm} = Es la energía consumida por el motor (kWh/año).

P_e = Es la potencia eléctrica demandada (kW).

h_{op} = Es el número de horas de operación anual (hr/año).

A partir de la facturación por el servicio de suministro de energía eléctrica, para el sitio donde se encuentra el motor, calcular el costo unitario de energía en kWh mediante la ecuación E.7.

$$CUE = \frac{\text{Importe total de la facturación}}{\text{Consumo total de energía}}$$

ECUACIÓN 104 E7

El costo anual de la energía consumida por el motor será:

$$\text{Costo energía anual} = E_{cm} * CUE$$

ECUACIÓN 105 E8

Paso 2.- Proponer un motor nuevo de alta eficiencia.

Calcular la potencia mecánica entregada por el motor actual:

$$P_m = P_e * \eta_m$$

ECUACIÓN 106 E9

Donde:

P_m = Es la potencia mecánica entregada por el motor (kW).

P_e = Es la potencia eléctrica demandada (kW).

η_m = Es la eficiencia de operación del motor actual que se determina en el capítulo 10.1.4.1.

Calcular la potencia nominal teórica del motor, para que éste trabaje al 75% de su capacidad:

$$HP_{nt} = \frac{P_m}{0.75}$$

ECUACIÓN 107 E10

Donde:

HP_{nt} = Es la potencia nominal teórica (HP).

P_m = Es la potencia mecánica suministrada (kW).

0.746 = Es el factor de conversión de HP a kW.

Seleccionar al motor propuesto con la potencia comercial que más se acerque a la potencia nominal teórica, con el número de polos y voltaje nominal iguales al del motor actual. Cotizar el motor de alta eficiencia propuesto y solicitar al proveedor el valor nominal de la eficiencia.

Paso 3.- Cálculo de los ahorros de energía por alcanzar.

Calcular la potencia que demandará el motor propuesto:

$$P_e' = P_e * \frac{\eta_m}{\eta_m'}$$

ECUACIÓN 108 E11

Donde:

P_e' = Es la potencia eléctrica que demandará el motor propuesto (kW).

P_e = Es la potencia eléctrica demandada por el motor actual (kW).

η_m = Es la eficiencia de operación del motor actual.

η_m' = Es la eficiencia de operación del motor propuesto.

Calcular la energía anual que consumiría el motor propuesto:

$$E_{mc}' = P_e' * H_{op}$$

ECUACIÓN 109 E12

Donde:

E'_{mc} = Es la energía anual consumida por el motor propuesto (kWh/año).

Pe' = Es la potencia eléctrica demandada por el motor propuesto (kW).

H_{op} = Es al número de horas de operación de motor (hr/año).

Calcular los ahorros anuales que se obtendrán con el motor propuesto:

$$A\$ = (E_{mc} - E'_{mc}) * CUE$$

ECUACIÓN 110 E13

Donde:

$A\$$ = Es el ahorro económico anual que se obtendrá con la sustitución del motor actual (\$/año).

E_{mc} = Es la energía anual que consume el motor actual (kwh/año).

E'_{mc} = Es la energía anual que consumiría el motor propuesto (kWh/año).

CUE = Es el costo unitario de la energía (\$/kWh).

Evaluación de ahorros por sustitución del conjunto motor -bomba

Paso 1.- Calcular el Costo Anual de la Energía Consumida por el Motor de la Bomba en operación.

A partir del número de horas de operación al año del equipo y de la potencia demandada por el motor, se calcula la energía anual consumida, mediante la ecuación E.12.

A partir de la facturación por el servicio de suministro de energía eléctrica, para el sitio donde se encuentra la bomba, calcular el costo integrado del kWh para cada equipo en particular, mediante la E.7. El costo anual de energía se obtiene con la ecuación E.8.

Paso 2.- Proponer una nueva bomba que trabaje en la zona de máxima eficiencia y calcular las eficiencia electromecánica.

Seleccionar el motor apropiado a la bomba seleccionada cuidando que el factor de carga este entre 75 y 85 % como máximo.

Verificar la eficiencia del motor y de la bomba seleccionados.

Calcular la eficiencia electromecánica multiplicando las eficiencias de bomba y motor, por medio de la ecuación E.14.

$$\eta_{em} = \eta_b * \eta_m$$

ECUACIÓN 111 E14

Paso 3.- Cálculo de los ahorros a obtenerse.

Calcular la potencia eléctrica que demandará el conjunto propuesto:

$$P_e' = \frac{P_h}{\eta_{em}}$$

ECUACIÓN 112 E15

Donde:

P_e' = Potencia eléctrica que demandará el motor con la bomba propuesta (kW).

P_h = Potencia hidráulica basado en las condiciones de operación de diseño que demandará la bomba propuesta (kW).

η_{em} = Eficiencia electromecánica del conjunto propuesto.

Calcular la energía anual que consumiría el conjunto propuesto:

$$E'_{mb} = P'_{emb} * H_{op}$$

ECUACIÓN 113 E16

Donde:

E'_{mb} = Energía anual consumida por el motor con la bomba propuesta (kWh/año).

P'_{emb} = Potencia eléctrica que demandará el motor con la bomba propuesta (kW).

H_{op} = Número de horas de operación anuales del equipo (h/año).

Calcular los ahorros anuales que se obtendrán con el conjunto propuesto con la ecuación E.17.

$$A\$_{bm} = (E_{mb} - E'_{mb}) * CUE$$

ECUACIÓN 114 E17

Donde:

$A\$_{bm}$ = Ahorro económico anual que se obtendrá con la sustitución de la bomba y motor actuales (\$/año).

E_{mb} = Energía anual que consume el motor con la bomba actual (kwh/año).

E'_{mb} = Energía anual que consumiría el motor con la bomba propuesta (kWh/año).

CUE = Costo unitario de la energía (\$/kWh).

Una vez determinados los ahorros a lograrse con la implantación de la medida, estimar el monto de las inversiones necesarias para su aplicación y realizar la evaluación económica de rentabilidad.

Evaluación de ahorros de energía eléctrica por optimización del factor de potencia

Paso 1. Identificar los equipos que se encuentren con un valor por debajo del 92 %.

Estos valores se obtienen de la recopilación de información que se realiza al inicio del proyecto, específicamente del análisis de la facturación energética actualizada.

Los pasos dos al cuatro siguientes deben aplicarse a todos los equipos.

Paso 2. Calcular la capacidad del banco de capacitores a instalar.

i) Cálculo de la energía reactiva consumida al mes.

$$E_r = \sqrt{\left(\frac{E_a}{FP}\right)^2 - (E_a)^2}$$

ECUACIÓN 115 E18

Donde:

E_r = Energía reactiva promedio demandada al mes (kVARh).

E_a = Energía activa promedio consumida al mes (kWh).

FP = Factor de potencia promedio mensual.

ii).- Cálculo la energía reactiva que se consumirá con la mejora del factor del potencia al 98%.

$$E'_r = \sqrt{\left(\frac{E_a}{0.98}\right)^2 - (E_a)^2}$$

ECUACIÓN 116 E19

Donde:

E'_r = Energía reactiva que se demandará con la mejora del factor de potencia a 98 % (kVARh/mes).

iii) Cálculo la energía reactiva E_c (en KVARh), que se tendrá que producir con los capacitores.

$$E_c = E_r - E'_r$$

ECUACIÓN 117 E20

iv) Cálculo de la capacidad del banco de capacitores.

$$C_{bc} = \frac{E_c}{N_{hm}}$$

ECUACIÓN 118 E21

Donde:

C_{bc} = Capacidad del banco de capacitores a proponer (kVAc).

N_{hm} = Número de horas promedio al mes que el sistema opera.

v) Especificar la capacidad del banco de capacitores a instalar

Investigar entre los proveedores de bancos de capacitores, que banco comercial tiene una capacidad similar a la calculada en el punto anterior, y seleccionar dicha capacidad para el proyecto. Entonces, C_a es la capacidad del banco de capacitores a especificar.

Paso 3.- Calcular el factor de potencia que se obtendrá con la instalación del banco de capacitores especificado.

Calcular la energía reactiva generada con el banco de capacitores especificado, E'_c (en kVArh).

$$E'_c = C_a * N_{hm}$$

ECUACIÓN 119 E22

ii) Calcular la energía reactiva que se demandará de la red, E''_r (en kVArh), con el banco de capacitores especificado.

$$E''_r = E_r - E'_c$$

ECUACIÓN 120 E23

iii) Calcular el factor de potencia que se obtendrá con la instalación del banco de capacitores especificado, FP' .

$$FP' = \frac{E_a}{\sqrt{(E_a)^2 + (E''_r)^2}}$$

ECUACIÓN 121 E24

Paso 4.- Calcular el importe de los ahorros a lograr con la medida.

i) Calcular el importe del cargo por bajo factor de potencia que se dejará de pagar.

$$Si FP > 0.9 \Rightarrow \Delta C_{fp} = 0.0$$

ECUACIÓN 122 E25

$$Si FP < 0.9 \Rightarrow \Delta C_{fp} = F * \left(\frac{0.54 - 0.6 * FP}{0.54 + 0.4 * FP} \right)$$

ECUACIÓN 123 R26

Donde:

ΔC_{fp} = Importe del cargo por bajo factor de potencia (\$).

F = Importe promedio de la facturación eléctrica (\$).

FP = Factor de potencia.

ii) Calcular el importe de la bonificación actual (ΔB_{fp}) por factor de potencia superior a 0.9.

$$Si FP < 0.9 \Rightarrow \Delta B_{fp} = 0.0$$

ECUACIÓN 124 E27

$$Si FP > 0.9 \Rightarrow \Delta B_{fp} = F * \left(\frac{0.25 * FP - 0.225}{1.25 * FP - 0.225} \right)$$

ECUACIÓN 125 E28

iii) Calcular el importe de la bonificación que se obtendrá con la instalación del banco de capacitores especificado ($\Delta B'_{fp}$).

$$Si \Delta B'_{fp} = F * \left(\frac{0.25 * FP - 0.225}{1.25 * FP - 0.225} \right)$$

ECUACIÓN 126 E29

iv) Calcular el importe de los ahorros a lograrse con la optimización del factor de potencia

$$A\%_{FP} = \Delta C_{fp} + \Delta B'_{fp} - \Delta B_{fp}$$

ECUACIÓN 127 E30

Evaluación de ahorros por control de demanda en hora punta

Paso 1.- Calcular la demanda facturable promedio actual, así como los consumos de energía promedio en punta, intermedio y pase.

A partir de la serie histórica de datos de facturación, como la mostrada en la tabla E.5.

TABLA E.5. FORMATO DE SERIE HISTÓRICA DE DATOS DE FACTURACIÓN

Periodo	Energía (kWh)			Demanda Máxima (kW)		
	Punta	Intermedio	Base	Punta	Intermedio	Base
1						
2						
..						
..						
Promedio	E_p	E_i	E_b	D_p	D_i	D_b

Calcular la demanda facturable promedio como:

$$DF = D_p + FRI * (\max(D_i - D_p), 0) + FRB * (\max(D_b - D_{pi}), 0)$$

ECUACIÓN 128 E31

Donde:

DF =Demanda facturable promedio.

FRI =Factor de reducción en horario intermedio aplicable a la región tarifaria donde se encuentre el servicio del equipo de bombeo.

FRB =Factor de reducción en horario de base, aplicable a la región tarifaria donde se encuentre el servicio del equipo de bombeo.

Paso 2.- Determinar la carga de bombeo que se podrá parar en horario de punta, así como la que se tendrá que incrementar fuera del horario de punta y la demanda facturable.

Proponer una nueva forma de operación de los equipos, de manera tal que la carga de bombeo en horario de punta sea la menor posible. Para ello, apoyarse con la capacidad de regularización de los tanques.

Como resultado de este análisis, calcular la carga de bombeo que estará operando en cada uno de los horarios, así como el número de horas de operación al mes, de manera que se pueda calcular la energía que se consumirá en cada uno de los horarios, ver tabla E.6.

TABLA 77 E.6. FORMATO DE DATOS PARA EL PARO EN HORA PUNTA DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO

Energía (kWh)			Demanda Máxima (kW)		
Punta	Intermedio	Base	Punta	Intermedio	Base
E_p'	E_i'	E_b'	D_p'	D_i'	D_b'

Calcular la demanda facturable promedio con el paro en hora punta (DF') como:

$$DF' = D'_p + FRI * (\max(D'_i - D'_p), 0) + FRB * (\max(D'_b - D'_p), 0)$$

ECUACIÓN 129 E32

Paso 3.- Determinar los ahorros a obtener con la medida.

Calcular el importe de la facturación actual:

$$F\$ = (DF * CDF) + (E_p * CEP) + (E_i * CEI) + (E_b * CEB)$$

ECUACIÓN 130 E33

Donde:

F\$ =Importe de la facturación actual.

DF =Demanda facturable.

Ep =Energía de punta consumida en promedio al mes.

Ei =Energía intermedia consumida en promedio al mes.

Eb =Energía de base consumida en promedio al mes.

CDF =Costo unitario de la demanda facturable según la región tarifaria.

CEP =Costo unitario de la energía de punta según la región tarifaria.

CEI =Costo unitario de la energía intermedia según la región tarifaria.

CEB =Costo unitario de la energía de base según la región tarifaria.

Calcular el importe de la facturación esperado:

$$F\$' = (DF' * CDF) + (E_p' * CEP) + (E_i' * CEI) + (E_b' * CEB)$$

ECUACIÓN 131 E34

Donde:

F\$' = Importe de la facturación esperada.

DF' = Demanda facturable esperada.

Ep' = Energía de punta esperada al mes.

Ei' = Energía intermedia esperada al mes.

Eb' = Energía de base esperada al mes.

Calcular los ahorros económicos a lograrse, $\Delta F\$$.

$$\Delta F\$ = F\$ - F\$'$$

ECUACIÓN 132 E35

|