



---

## EVALUACIÓN PARA SISTEMAS DE BOMBEO DE AGUA

Manual de eficiencia energética  
Primera edición



Iniciativa de Agua y Saneamiento



Iniciativa de Energía Sostenible y Cambio Climático



**Banco Interamericano de Desarrollo**

# EVALUACIÓN PARA SISTEMAS DE BOMBEO DE AGUA

## Manual de eficiencia energética

Primera edición

Iniciativa de Agua y Saneamiento  
Iniciativa de Energía Sostenible y Cambio Climático  
Washington, D.C.  
2011

La producción de esta publicación estuvo a cargo de la Oficina de Relaciones Externas del BID.

© Banco Interamericano de Desarrollo, 2011. Todos los derechos reservados.  
Las opiniones expresadas en esta publicación pertenecen a los autores y no necesariamente  
reflejan los puntos de vista del BID.

Para mayor información o consultas, por favor dirigirse a: [agua@iadb.org](mailto:agua@iadb.org) o [secci@iadb.org](mailto:secci@iadb.org).

IDB-MG-112

# CONTENIDO

PRESENTACIÓN .....	vii
RESUMEN EJECUTIVO.....	ix
DEFINICIONES .....	xi
SIMBOLOGÍA .....	xiii
<b>Capítulo 1</b> <b>Introducción: una etapa clave del Plan Integral de Eficiencia Energética .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2</b> <b>Metodología para una auditoría energética .....</b>	<b>3</b>
Actividades de campo .....	4
Actividades de oficina .....	4
<b>Capítulo 3</b> <b>Investigación previa .....</b>	<b>7</b>
Contexto nacional y del sector energético .....	7
Contexto nacional del sector agua .....	7
Situación particular de la empresa de agua y saneamiento .....	7
<b>Capítulo 4</b> <b>Recolección de datos .....</b>	<b>9</b>
Datos del sistema eléctrico .....	11
Datos nominales del motor .....	12
Datos nominales de la bomba .....	13
<b>Capítulo 5</b> <b>Mediciones de campo .....</b>	<b>15</b>
Medición de parámetros eléctricos .....	15
Medición de parámetros hidráulicos .....	19
Formato de registro de datos en campo .....	24
Mediciones de temperatura .....	26
<b>Capítulo 6</b> <b>Análisis de la información y evaluación de la eficiencia .....</b>	<b>29</b>
Pérdidas energéticas en sistemas de agua .....	29
Balance de energía del sistema .....	30
Aspectos a evaluar en una auditoría de eficiencia energética .....	30
Cálculo de pérdidas eléctricas en conductores y transformadores .....	31
Cálculo de pérdidas y eficiencia del motor .....	36
Cálculo de pérdidas y eficiencia de la bomba .....	40
Cálculo de pérdidas de carga en tuberías .....	45
Cálculo de las pérdidas en la red .....	47
Cálculo de indicadores energéticos .....	53
Elaboración de balances de energía .....	54
Ánálisis de las condiciones de operación .....	56
<b>Capítulo 7</b> <b>Identificación de oportunidades de ahorro de energía .....</b>	<b>59</b>
Medidas relacionadas con la tarifa de energía.....	59
Medidas para la reducción de pérdidas en las instalaciones eléctricas.....	62

Medidas para incrementar la eficiencia de los motores .....	66
Medidas para incrementar la eficiencia de las bombas .....	70
Reducción de pérdidas de carga.....	74
Reducción de fugas .....	75
Mejorar la operación .....	77
Mejorar el mantenimiento .....	80
Reemplazo de la fuente de suministro de energía eléctrica.....	80

## **Capítulo 8**

<b>Evaluación de las medidas de ahorro .....</b>	<b>85</b>
Evaluación de los ahorros (balance de energía esperado) .....	85
Evaluación económica del ahorro y tasa de retorno .....	86
Elaboración del reporte final del plan de eficiencia energética.....	88

## **Lista de cuadros**

Cuadro 4.1 Información a recopilar de la empresa de agua .....	9
Cuadro 5.1 Descripción de la campaña de medición .....	15
Cuadro 5.2 Proceso de cálculo para la carga hidráulica de bombeo (H <sub>b</sub> ) y parámetros a medir .....	24
Cuadro 5.3 Formato para el registro de datos nominales y características del sistema electromecánico ..	25
Cuadro 5.4 Formato para el registro de mediciones de variables hidráulicas y eléctricas de equipos de bombeo.....	26
Cuadro 6.1 Pérdidas en un transformador eléctrico en función de su capacidad nominal.....	32
Cuadro 6.2 Resistencia para diferentes calibres de conductor y caída de voltaje para el ejemplo en desarrollo .....	35
Cuadro 6.3 Cálculo de pérdidas energéticas por efecto Joule finales para el ejemplo en desarrollo .....	36
Cuadro 6.4 Depreciación de la eficiencia de un motor rebobinado en función de la temperatura utilizada.....	38
Cuadro 6.5 Viscosidad dinámica del agua .....	45
Cuadro 6.6 Ejemplo de disagregación de pérdidas en un sistema de bombeo del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) en Costa Rica.....	55
Cuadro 7.1 Análisis comparativo de tarifas eléctricas .....	60
Cuadro 7.2 Acciones recomendadas para mejorar las condiciones en un transformador.....	63
Cuadro 7.3 Acciones recomendadas para corregir el desbalance de voltaje de alimentación a los motores eléctricos.....	66
Cuadro 7.4 Acciones recomendadas para corregir condiciones de operación ineficiente de los motores eléctricos .....	68
Cuadro 7.5 Acciones recomendadas para ajustar las curvas del equipo de bombeo a la condición real de operación .....	71
Cuadro 7.6 Secuencia de actividades para implementar un programa de control de fugas .....	76
Cuadro 8.1 Formato de resumen de ahorros de energía derivados del plan de ahorro de energía .....	87

## **Lista de gráficos**

Gráfico i Diagrama simple del balance de energía .....	ix
Gráfico 1.1 Esquema de las etapas necesarias para la realización de un PIEE .....	1
Gráfico 1.2 Esquema de un sistema típico de suministro y consumo energético en sistemas de agua potable y saneamiento .....	2
Gráfico 2.1 Metodología para realizar una auditoría energética.....	3
Gráfico 5.1 Medición de la tensión (voltaje) en equipos de bombeo .....	17
Gráfico 5.2 Medición de corriente eléctrica en equipos de bombeo .....	18
Gráfico 5.3 Medición de la potencia real después de los capacitores .....	19
Gráfico 5.4 Medición de la potencia real antes de los capacitores.....	19
Gráfico 5.5 Posición del medidor de caudal.....	20
Gráfico 5.6 Medición de niveles en caso de tener únicamente manómetro en la descarga .....	22
Gráfico 5.7 Medición de niveles en caso de contar con manómetros en succión y descarga .....	22
Gráfico 5.8 Medición de niveles en equipos sumergibles .....	22

Gráfico 6.1 Pérdidas energéticas típicas en los componentes electromecánicos de un sistema de agua . . . . .	29
Gráfico 6.2 Descripción gráfica del balance de energía del sistema . . . . .	30
Gráfico 6.3 Detalle de componentes típicos de una subestación . . . . .	31
Gráfico 6.4 Pérdidas en transformadores en función de la temperatura. . . . .	33
Gráfico 6.5 Flujo de energías en un motor eléctrico. . . . .	36
Gráfico 6.6 Curva típica de eficiencia frente a carga para motores de inducción de jaula de 1800 RPM . . . . .	37
Gráfico 6.7 Puntos de eficiencia a depreciar en función de la diferencia de voltaje con respecto a la nominal en un motor eléctrico . . . . .	39
Gráfico 6.8 Reducción porcentual de la eficiencia de un motor eléctrico en función del desbalance de voltaje. . . . .	39
Gráfico 6.9 Diagrama energético global de las bombas centrífugas . . . . .	41
Gráfico 6.10 Diagrama esquemático de las eficiencias que integran la eficiencia electromecánica. . . . .	42
Gráfico 6.11 Diagrama de Moody. . . . .	46
Gráfico 6.12 Arreglo típico de bombas centrífugas operadas en paralelo. . . . .	48
Gráfico 6.13 Características de carga-capacidad de bombas centrífugas operadas en paralelo. . . . .	48
Gráfico 6.14 Efecto de varias bombas en paralelo sobre el sistema de conducción . . . . .	49
Gráfico 6.15 Nomograma para cálculo de longitud equivalente en accesorios de tuberías . . . . .	52
Gráfico 6.16 Disgregación de pérdidas de un sistema de bombeo del AyA en Costa Rica . . . . .	55
Gráfico 6.17 Diagrama esquemático de los problemas que se presentan por operación de las bombas fuera de su punto óptimo . . . . .	57
Gráfico 6.18 Modificación de la eficiencia por variación de condiciones de operación en una bomba . . . . .	58
Gráfico 7.1 Comparación de costos por tarifa . . . . .	61
Gráfico 7.2 Curva típica de dos equipos de bombeo con curvas H-Q diferentes . . . . .	70
Gráfico 7.3 Diagrama de una bomba de turbina de flecha de impulsor abierto y sus componentes . . . . .	72
Gráfico 7.4 Diagrama de un motor flecha hueca acoplado a una bomba de turbina . . . . .	73
Gráfico 7.5 Esquema de funcionamiento de un molino de viento para extraer agua subterránea . . . . .	82
Gráfico 8.1 Balance de energía esperado al implementar un plan de ahorro de energía . . . . .	85

### ***Lista de fotografías***

Fotografía 5.1 Medición de presión con manómetro tipo Bourdon calibrado. . . . .	21
Fotografía 5.2 Medición del nivel dinámico de succión en cárcamos de bombeo . . . . .	23
Fotografía 5.3 Medición del nivel dinámico en cárcamos de bombeo. . . . .	23
Fotografía 6.1 Componentes típicos de una subestación . . . . .	31
Fotografía 6.2 Componentes típicos del sistema electromotriz de un sistema de bombeo . . . . .	34



## **PRESENTACIÓN**

Con el propósito de mejorar el servicio de agua potable que se brinda a la sociedad de los países de América Latina, a través del desarrollo de una metodología regional de eficiencia energética y mantenimiento que pueda ser aplicada por empresas de agua, en el marco del Programa de Cooperación Técnica “Eficiencia Energética en Empresas de Agua y Saneamiento en Centroamérica” financiado por el Fondo Especial de Operaciones del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), se ha contado con los servicios de consultoría de Econoler Internacional y Alliance to Save Energy, con el fin de desarrollar dicha metodología de eficiencia energética y mantenimiento en el sector de agua y saneamiento. La presente publicación corresponde al Manual de evaluación de eficiencia energética para sistemas de bombeo en empresas de agua y saneamiento, que se ha delineado a estos efectos. También están disponibles un Manual de mantenimiento para sistemas de bombeo de agua, una Hoja de cálculo de eficiencia energética para sistemas de bombeo y una Guía para la hoja de cálculo.

La elaboración del presente manual fue dirigida por la Unidad de Energía Sostenible y Cambio Climático (ECC) y la División de Agua y Saneamiento (WSA), por Christoph Tagwerker (ECC), Marcello Basani (WSA), Rodrigo Riquelme (WSA) y Gerhard Knoll (WSA). El trabajo fue desarrollado por las firmas Econoler International y Alliance to Save Energy, dirigidas por los ingenieros Arturo Pedraza y Ramón Rosas.

Iniciativa de Agua y Saneamiento  
Iniciativa de Energía Sostenible y Cambio Climático

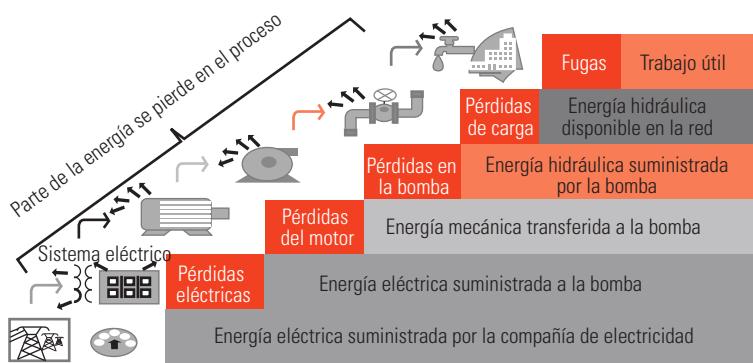


## RESUMEN EJECUTIVO

**E**n este manual se describen las etapas necesarias para realizar una auditoría energética (AE) en un sistema de agua y saneamiento para América Latina, así como también las principales técnicas de ingeniería que se utilizan para el diagnóstico y la evaluación de las oportunidades de ahorro más importantes en este tipo de sistemas, con el objetivo de identificar medidas técnicas y administrativas rentables para el ahorro de energía en dichas instalaciones.

El principio conceptual de la AE es el balance de energía. Este se basa esencialmente en determinar la energía consumida y las pérdidas en cada componente del proceso de bombeo: es decir, desde la entrada de energía en la acometida del suministrador, pasando por todos los elementos del sistema, hasta la entrega de agua al punto de uso. Este método permite distinguir cuánta energía suministrada se convierte en trabajo útil, que es el mínimo trabajo para bombear el agua estrictamente necesaria hasta todos los puntos del sistema de distribución. En el gráfico i se presenta un diagrama simple del balance.

**GRÁFICO i** Diagrama simple del balance de energía



La energía que no se convierte en trabajo útil representa una pérdida y, por ende, áreas de oportunidad de ahorro. Esta técnica permite identificar y cuantificar en dónde están las mayores pérdidas y cuánto de esas pérdidas se puede ahorrar, sin dejar ninguna parte del sistema sin evaluar.

En este manual se explica de manera exacta la secuencia ordenada de actividades necesarias para la AE, las cuales se presentan a continuación en forma resumida:

**Investigación previa.** En esta actividad se revisa el contexto del país donde se desenvuelve la empresa de agua, sobre todo en materia de situación de los recursos hidráulicos y energéticos.

**Actividades de campo.** Aquí se incluyen la recolección de datos clave de los sistemas de bombeo y otros componentes (motores, bombas, conducciones, tanques y datos adicionales como las condiciones de operación, población y topografía) y mediciones de campo, de acuerdo con las cuales se recogen los principales parámetros operativos, hidráulicos y energéticos necesarios para los cálculos de eficiencias, pérdidas y ahorros potenciales. En el manual se proporcionan las herramientas a manera de formatos para realizar la captación de los datos y su procesamiento automático.

**Procesamiento y análisis de la información.** Aquí se incluyen las evaluaciones de eficiencia, el cálculo de las pérdidas descritas para obtener los balances específicos para cada sistema, el cálculo de los indicadores energéticos, el análisis estadístico de los mismos, la elaboración de los balances de energía, y el análisis de la operación y las prácticas de mantenimiento.

**Elaboración de una propuesta de medidas de ahorro.** Con el análisis de la información y la evaluación de los elementos de mayor consumo de energía se determinan las medidas de ahorro, entre las cuales se destacan:

- Ahorro en tarifas de suministro.
- Reducción de pérdidas en las instalaciones eléctricas.
- Mejoras de la eficiencia en motores eléctricos.
- Mejoras de la eficiencia en bombas.
- Reducción de pérdidas mecánicas.
- Reducción de fugas de agua y pérdidas de carga.
- Mejoras en la operación.
- Mejoras en el mantenimiento.
- Sustitución del suministro de energía.
- Cambio de tecnología.
- Mejoramiento del alumbrado.

Se sugiere considerar medidas para implementar a mediano y largo plazo, entre ellas, las políticas de propaganda hacia la comunidad orientadas a propiciar el ahorro en el consumo de agua, ya que esto afecta directamente al consumo de energía y, por ello, se manifiesta en una reducción directa de las pérdidas.

Asimismo, se sugiere un plan de detección de pérdidas en la red de distribución de agua potable.

**Evaluación de las medidas.** Como parte final de esta metodología se explica cómo evaluar las medidas de ahorro, calculando para cada una de ellas los ahorros (directos e indirectos) que se alcanzarán, el monto total de las inversiones necesarias para su implantación, los costos adicionales asociados (operación, mantenimiento y consumibles) y los indicadores financieros (*payback*, valor presente neto, análisis del ciclo de vida del proyecto, etc.).

En el gráfico 2.1 (Metodología para realizar una auditoría energética) del capítulo 2 se podrá observar un diagrama que explica esta secuencia de actividades de la AE.

## DEFINICIONES

Las definiciones de términos y expresiones que se exhiben a continuación tienen por objeto proporcionar una idea común entre los usuarios del manual, de tal manera que todos manejen los mismos conceptos expuestos.

**Aforo.** Medición del caudal o gasto.

**Agua 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.

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

**Carga total de bombeo.** La suma algebraica de la carga de presión en la descarga, más el nivel de succión, más el nivel al centro del manómetro, más las pérdidas de fricción y singulares en la conducción, más 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 la tubería esté construida o recubierta, 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.

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

**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.

**Fuga.** Escape físico de agua en una red de tuberías de agua potable.

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

**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.

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

**Potencia eléctrica.** Es la potencia de entrada en watts (o vatios) que requiere el motor eléctrico acoplado a la bomba y en operación normal.

**Potencia aparente y reactiva.** En un triángulo rectángulo se asocia la potencia aparente a la hipotenusa, a un cateto se le asocia la potencia activa, y al otro se le asocia la potencia reactiva. Al coseno del ángulo existente entre la hipotenusa y el cateto adyacente, asociado a la potencia aparente y potencia activa, respectivamente, se le denomina Coseno Fi ( $\cos \theta$ ).

**Tensión eléctrica.** Trabajo eléctrico medido entre dos puntos de un circuito eléctrico.

## SIMBOLOGÍA

A lo largo del manual se utilizan los siguientes símbolos:

- A<sub>eco</sub>** = Ahorro económico anual que se obtendrá con la implantación de la medida de ahorro propuesta (\$/año).
- C<sub>o</sub>** = Capacidad requerida del capacitor.
- CUE** = Costo unitario de la energía (\$/kWh).
- D<sub>bv</sub>** = Desbalance de voltaje (V).
- D<sub>r-m</sub>** = Distancia del nivel de referencia al manómetro (m).
- E<sub>c</sub>** = Energía eléctrica consumida en el período de medición.
- FP** = Factor de potencia.
- g** = Aceleración de la gravedad (9,8 m/s<sup>2</sup>).
- H<sub>b</sub>** = Carga hidráulica de bombeo (m).
- h<sub>f</sub>** = Pérdidas de carga hidráulica por cortante (m).
- h<sub>fs</sub>** = Pérdidas de carga hidráulica por efecto del cortante más las pérdidas equivalentes por accesorios, en la tubería de succión (m).
- HP<sub>nominal</sub>** = Potencia nominal en el eje del motor (la real verificada en campo) (kW).
- H<sub>t</sub>** = Carga total de bombeo (m).
- h<sub>fta</sub>** = Pérdidas por cortante en la tubería actual (m).
- h<sub>ftp</sub>** = Pérdidas por cortante en la tubería propuesta (m).
- h<sub>v</sub>** = Carga de velocidad (m).
- I<sub>a</sub>** = Corriente eléctrica en fase A (A).
- I<sub>b</sub>** = Corriente eléctrica en fase B (A).
- I<sub>c</sub>** = Corriente eléctrica en fase C (A).
- I** = Corriente que circula en el conductor (A).
- I<sub>moe</sub>** = Monto de la inversión necesaria para la aplicación de la medida de ahorro propuesta (\$).
- I<sub>prom</sub>** = Corriente eléctrica promedio de las tres fases (A).
- L<sub>c</sub>** = Longitud total del conductor (m).
- L<sub>0</sub>** = Distancia entre los dos puntos de medición del voltaje (m).
- N<sub>s</sub>** = Nivel dinámico de succión de la bomba.
- n<sub>ri</sub>** = Período de recuperación de la inversión (años).
- P<sub>a</sub>** = Potencia activa medida (kW).
- P<sub>cu</sub>** = Pérdidas en el núcleo a tensión nominal (kW).
- P<sub>d</sub>** = Carga de presión en la descarga (m).
- P<sub>e</sub>** = Potencia eléctrica demandada por el motor.
- P<sub>e'</sub>** = Potencia eléctrica que demandará el motor propuesto (kW).
- P<sub>ebm</sub>** = Potencia eléctrica que demanda el conjunto motor-bomba actualmente.
- P<sub>emb'</sub>** = Potencia eléctrica esperada con el conjunto motor-bomba de mejor eficiencia.
- P<sub>et</sub>** = Potencia eléctrica que demanda el transformador actualmente.
- P<sub>eQm</sub>** = Potencia eléctrica que demanda el conjunto motor-bomba actualmente con el caudal medio.
- P<sub>eQm'</sub>** = Potencia eléctrica esperada con el caudal medio.
- P<sub>fe</sub>** = Pérdidas en el cobre a tensión nominal (kW).
- P<sub>h</sub>** = Potencia hidráulica de salida (kW).
- P<sub>j</sub>** = Pérdidas por efecto Joule (W).

- P<sub>mb</sub>** = Potencia mecánica absorbida por la bomba (HP).
- P<sub>n</sub>** = Potencia nominal del transformador en evaluación (kVA).
- p<sub>op</sub>** = Presión óptima de operación (m).
- P<sub>r</sub>** = Potencia reactiva medida (kVAr).
- P<sub>rt</sub>** = Potencia real considerando todas las cargas alimentadas por el transformador (kW).
- P<sub>s</sub>** = Carga de presión de succión (m).
- P<sub>tot</sub>** = Pérdidas totales (kW).
- Q** = Flujo volumétrico (m<sup>3</sup>/s).
- R** = Resistencia del conductor expresada ( $\Omega$ ).
- R'<sub>r</sub>** = Resistencia del conductor propuesto ( $\Omega/m$ ).
- R<sub>u</sub>** = Resistencia real del conductor ( $\Omega/m$ ).
- V** = Tensión eléctrica trifásica (V).
- V<sub>an</sub>** = Tensión de la fase A respecto a neutro (V).
- V<sub>bn</sub>** = Tensión de la fase B respecto a neutro (V).
- V<sub>cn</sub>** = Tensión de la fase C respecto a neutro (V).
- V<sub>A-B</sub>** = Tensión entre las fases A y B (V).
- V<sub>B-C</sub>** = Tensión entre las fases B y C (V).
- V<sub>C-A</sub>** = Tensión entre las fases C y A (V).
- V<sub>prom</sub>** = Tensión promedio entre fases (V).
- $\Delta E_a$**  = Energía anual que es viable ahorrar con la implementación del variador (kWh/año).
- $\Delta E$**  = Disminución de energía eléctrica consumida.
- $\Delta P_{et}$**  = Disminución de la potencia eléctrica esperada en el transformador.
- $\Delta P_e$**  = Disminución de potencia eléctrica demandada.
- $\Delta F$**  = Disminución de la facturación eléctrica.
- $\Delta P_r$**  = Disminución de la presión para ese registro.
- $\Delta V_j$**  = Caída de voltaje en un conductor eléctrico.
- $\gamma$**  = Peso específico del agua (kg/m<sup>3</sup>).
- $\eta_b$**  = Eficiencia de la bomba (%).
- $\eta_{em}$**  = Eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba (%).
- $\eta_{física}$**  = Eficiencia física (%).
- $\eta_m$**  = Eficiencia de operación del motor (%).
- $\eta'_m$**  = Eficiencia de operación del motor propuesto (%).
- $\eta'_{em}$**  = Eficiencia esperada de la bomba (%).
- $\eta_{trans}$**  = Eficiencia actual del transformador (%).
- $\eta'_{trans}$**  = Eficiencia esperada del transformador (%).
- $\rho$**  = Densidad del agua bombeada (kg/m<sup>3</sup>).
- A\$** = Ahorro económico anual que se obtendrá con la implementación del variador (\$/año).

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN: UNA ETAPA CLAVE DEL PLAN INTEGRAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

La auditoría energética (AE) en un sistema de agua y saneamiento es una parte fundamental y el punto de partida cuando se desea realizar un Plan Integral de Eficiencia Energética (PIEE).

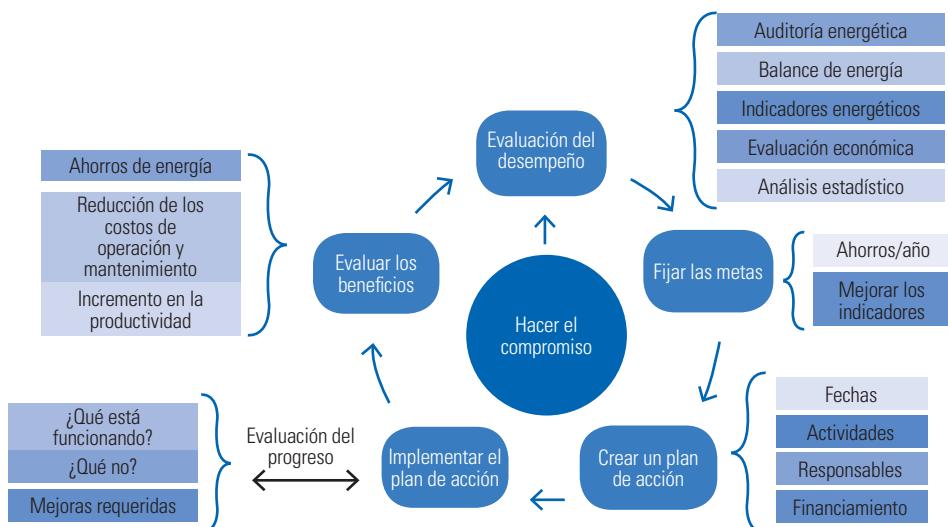
Realizar un PIEE en un sistema de agua y saneamiento implica el desarrollo de una secuencia ordenada y escalonada de etapas que lleven a determinar dónde y cuánta energía se utiliza a lo largo del sistema, el grado de eficiencia con la que es empleada esa energía, las medidas y los proyectos específicos que permitan reducir su consumo y su costo, el costo-beneficio o la rentabilidad de dichas acciones, el plan de implementación de las mismas, y los métodos de evaluación y monitoreo de los resultados.

Este proceso implica varios aspectos clave, entre los que cabe destacar:

- El compromiso real de la empresa de agua y saneamiento.
- La evaluación del desempeño en el consumo energético, incluida su relación con la operación del sistema y el mantenimiento.
- El diseño de un plan de acción, lo cual implica definir las metas, los tiempos, los responsables y los recursos a utilizar.
- La evaluación y el monitoreo de los resultados, lo cual implica medir el progreso de la implementación del plan y efectuar un seguimiento de los resultados o beneficios reales que se logren al final del proceso y en forma periódica.

En el gráfico 1.1 se presenta un esquema de las etapas necesarias para la realización de un PIEE.

**GRÁFICO 1.1** Esquema de las etapas necesarias para la realización de un PIEE

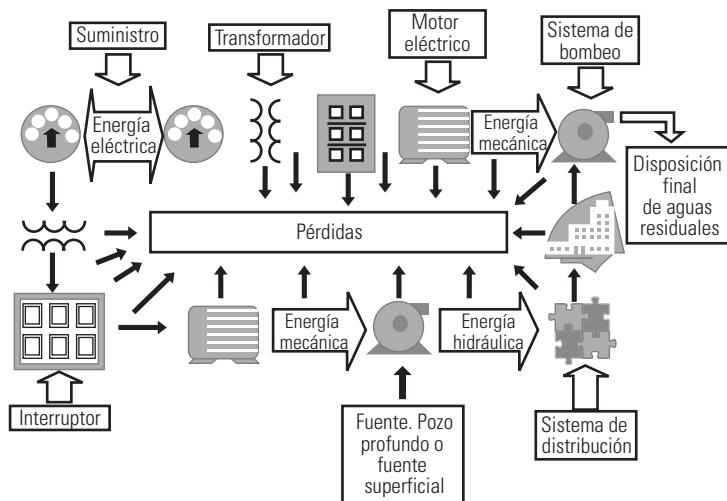


Como se puede observar, en la primera etapa del proceso, durante la evaluación del desempeño, se encuentra la realización de la AE, que es el objetivo de este manual.

Esta actividad constituye una etapa clave dentro del proceso, toda vez que es la base para definir los potenciales de ahorro de energía que pueden lograrse y las acciones específicas para ello.

En el caso de los sistemas de agua y saneamiento, los principales elementos para el suministro y la transformación energética necesarios para la producción, el suministro y el tratamiento del agua se muestran esquemáticamente en el gráfico 1.2, en el cual se puede ver la cadena de equipos, que abarca desde el medidor de consumo del suministrador de energía, el transformador, el centro de control del motor y sus elementos correspondientes, hasta el motor eléctrico, la bomba y la disposición final del agua potable y residual.

**GRÁFICO 1.2** Esquema de un sistema típico de suministro y consumo energético en sistemas de agua potable y saneamiento



En los siguientes capítulos se describirán los métodos y procedimientos necesarios para realizar la mencionada AE.

## Capítulo 2

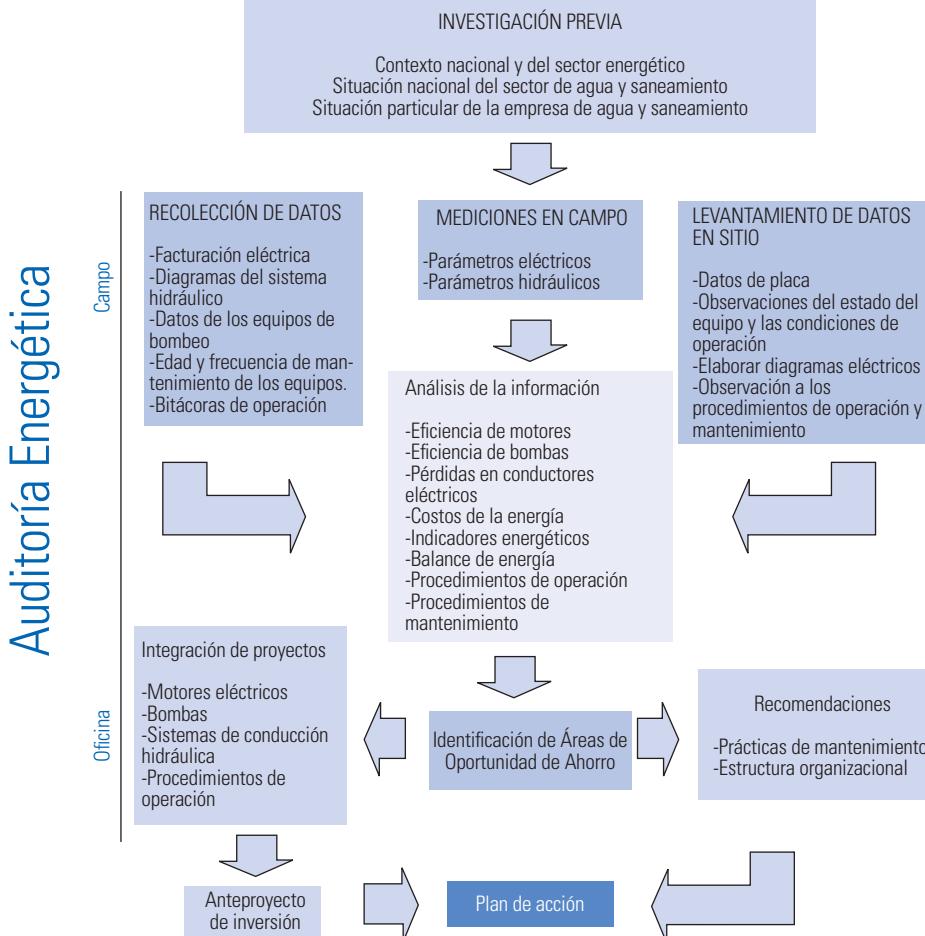
### METODOLOGÍA PARA UNA AUDITORÍA ENERGÉTICA

La auditoría energética (AE) en un sistema de agua y saneamiento es la aplicación de un conjunto de técnicas para determinar cómo se administra la energía, así como también para comprobar la eficiencia en cada uno de los componentes consumidores en una instalación de agua y saneamiento. Consiste en el análisis crítico de todos los componentes en una instalación consumidora de energía para determinar dónde y cómo se utiliza la misma, además de especificar cuánta se desperdicia.

El objetivo final es la identificación de medidas técnicas y administrativas rentables para el ahorro de energía en dicha instalación, como parte del desarrollo de un Plan Integral de Eficiencia Energética.

Para ejecutar la AE, se sugiere seguir una secuencia ordenada que lleve a mejores resultados. Dicha secuencia requiere realizar trabajos de campo y oficina. En el gráfico 2.1 se muestra un diagrama que indica de manera resumida las principales actividades necesarias para realizar una AE en una empresa de agua.

**GRÁFICO 2.1** Metodología para realizar una auditoría energética



Grosso modo, y siguiendo un orden de las actividades descritas en el gráfico 2.1, la metodología consiste en realizar trabajos en dos etapas: una primera etapa con trabajos de campo y una segunda con trabajos de oficina, que para fines prácticos se definen a continuación.

## ACTIVIDADES DE CAMPO

Las actividades de campo a realizarse son las siguientes:

**1. Investigación previa.** Tiene por objeto revisar el contexto general del ambiente de una empresa de agua y saneamiento. Con la investigación previa se determinan los sistemas y equipos que podrían ser susceptibles para la aplicación de la AE.

**2. Recolección de datos.** Después de la investigación previa, se deberán recolectar los datos básicos de los sistemas, los motores, las bombas, las conducciones, los tanques, los planos eléctricos e hidráulicos, de las disciplinas relacionadas y datos adicionales como las condiciones de operación, población y topografía, necesarios para la realización de la AE.

**3. Planificación de mediciones de campo.** Con la información obtenida en los puntos anteriores, se deberá hacer un análisis de la planta que permita identificar los procesos y asociados a ellos la relevancia del consumo de energía, y generar un ordenamiento cuantitativo. Con estos datos se deberá definir una estrategia para el trabajo de campo, poniendo énfasis en las áreas más interesantes desde el punto de vista energético.

**4. Mediciones de campo.** Se debe realizar una campaña de mediciones de campo de los parámetros eléctricos e hidráulicos que permitirán realizar los cálculos de pérdidas y balance energético de los equipos sujetos a la AE, y con esto determinar los elementos que tienen un potencial de ahorro importante y generar las propuestas de medidas de ahorro correspondientes. Las mediciones deben estar enfocadas en el establecimiento de la línea base de los procesos y de la planta en su conjunto.

## ACTIVIDADES DE OFICINA

Las actividades de oficina a realizarse son las siguientes:

**5. Análisis de la información y evaluación de la eficiencia.** Una vez recolectada la información producto de las actividades de campo, esta deberá ser analizada. El análisis propuesto en esta metodología se refiere a los cálculos de pérdidas y a la siguiente información:

- Cálculo de pérdidas eléctricas en conductores y transformadores.
- Cálculo de pérdidas y eficiencia del motor.
- Cálculo de pérdidas y eficiencia de la bomba.
- Cálculo de pérdidas de carga en tuberías.
- Cálculo de pérdidas en la red.
- Cálculo de indicadores energéticos.
- Análisis estadístico de los indicadores.
- Elaboración de balances de energía.

- Análisis de la operación.
- Análisis del mantenimiento.

Con esto se determinan los elementos con un alto índice de pérdidas o menor eficiencia, a fin de concentrar en ellos las medidas de ahorro.

**6. Propuesta de medidas de ahorro.** Con el análisis de la información y la evaluación de los elementos de mayor consumo de energía, se determinan las medidas de ahorro que –para la metodología compuesta– pueden incluir una o varias de las siguientes:

- Ahorros en tarifas de suministro.
- Reducción de pérdidas en las instalaciones eléctricas.
- Mejora de la eficiencia en motores eléctricos.
- Mejora de la eficiencia en bombas.
- Reducción de pérdidas mecánicas.
- Reducción de fugas de agua y pérdidas de carga.
- Mejoras en la operación.
- Mejoras en el mantenimiento.
- Sustitución del suministro de energía.
- Mejoramiento del alumbrado.
- Cambio de tecnologías.
- Aprovechamiento de energías residuales.

La importancia del balance de energía reside en que las medidas a tomar deben considerar la eficiencia operacional del servicio, es decir: que este cumpla o siga cumpliendo con el estándar definido de la prestación del servicio (caudal, continuidad del servicio y presión mínima).

**7. Evaluación de las medidas.** Como parte final de esta metodología se deben evaluar las medidas de ahorro, lo cual consiste en realizar lo siguiente:

- Calcular los ahorros (directos e indirectos) que se alcanzarán con la medida.
- Calcular el monto total de las inversiones necesarias para la implantación de la medida.
- Calcular los costos adicionales (operación, mantenimiento y consumibles) asociados a la medida.
- Determinar los indicadores financieros (*payback*, valor presente neto, análisis del ciclo de vida del proyecto, etc.).

Siguiendo con esta metodología en forma ordenada, en los próximos capítulos se desarrollan las bases teóricas, los procedimientos y las actividades específicas que le permitirán a la empresa de agua y saneamiento llevar a cabo la AE en los sistemas de bombeo.



## **Capítulo 3**

### **INVESTIGACIÓN PREVIA**

**C**on el fin de obtener un conocimiento general de la situación de la empresa de agua y saneamiento, antes de empezar a realizar una AE de los sistemas de bombeo es indispensable realizar una investigación previa de la situación actual de la empresa.

Durante la investigación previa se analizarán los sistemas que grosso modo podrían ser susceptibles de ahorro o que tienen un potencial de ahorro energético importante.

La investigación previa consiste en recopilar toda la información del contexto donde se desenvuelve la empresa de agua, en los aspectos que se detallan a continuación.

#### **CONTEXTO NACIONAL Y DEL SECTOR ENERGÉTICO**

Se debe conocer el contexto nacional donde se encuentra posicionada la empresa de agua y saneamiento, de lo general a lo particular. Para conocer este entorno, se debe recopilar la siguiente información:

- Datos generales de la población.
- Situación energética, fuentes de energía, consumos de energía general y por sectores, etc.
- Estructura de las tarifas de energía.
- Problemática particular.
- Situación de la madurez legal del uso eficiente. Leyes con que se cuenta para presionar el uso eficiente.

#### **CONTEXTO NACIONAL DEL SECTOR AGUA**

Es de suma importancia conocer la posición actual y el contexto general a nivel nacional del sector agua, sus leyes, reglamentos, estadísticas generales, dentro de las cuales se desempeña la empresa de agua a auditar. Para esto se requiere obtener la siguiente información:

- Tipos de compañías de agua (públicas, privadas, etc.).
- Contexto jurídico del agua.
- Principales fuentes de agua disponibles.
- Estadísticas nacionales de demanda de agua, cobertura de agua potable y alcantarillado, prospectiva, etc.
- Problemas para el suministro de agua en el país. Características topográficas, distancia de las fuentes, etc.
- Otra información de utilidad.

#### **SITUACIÓN PARTICULAR DE LA EMPRESA DE AGUA Y SANEAMIENTO**

Por último, en esta investigación inicial se requiere revisar en lo particular el tamaño, la forma de operación, la tecnología que aplica, y los aspectos específicos del servicio de agua y saneamiento que realiza la empresa correspondiente. Para esto se debe obtener información sobre los siguientes aspectos:

- Infraestructura general: número y tipo de instalaciones.
- Impacto del consumo de energía de la empresa de agua y saneamiento sobre el consumo energético nacional.

- Instalaciones con mayor consumo de energía, y su impacto en los costos totales.
- Otros aspectos de interés con relación al agua y a la energía, como por ejemplo el nivel de pérdidas de agua (agua no contabilizada) y la identificación de la estructura de gestión energética.

Se reitera que la información que conforma la investigación previa es general y con ella se realizará una mejor planificación inicial de la auditoría energética seleccionando los sistemas de bombeo prioritarios por su importancia en el consumo, aquellos que en principio se detecte que tienen un potencial de ahorro importante, etc.

Una vez realizado el análisis de toda la información obtenida durante esta investigación previa, se deberá proceder a cumplir con los pasos siguientes de la auditoría, como se verá, en forma más detallada, en los próximos capítulos.

## Capítulo 4

### RECOLECCIÓN DE DATOS

No se puede realizar un estudio o procedimiento de auditoría sin la obtención de los datos necesarios o la recopilación de los mismos, por lo que a continuación se describen los datos básicos necesarios así como también la forma o las técnicas más usuales para obtenerlos.

La recolección de datos básicos se realiza de dos maneras:

- Por medio de la recopilación y el examen de la información de la empresa de agua.
- Mediante la relevación de datos en el sitio de análisis.

En el cuadro 4.1 se define la información requerida que deberá ser proporcionada por la empresa de agua para la realización de la AE.

**CUADRO 4.1** Información a recopilar de la empresa de agua

Área	Fuente de información	Información a recopilar	Observaciones
General	Padrón de usuarios	Número de tomas domiciliarias	Clasificadas por tipo de uso, con y sin medidor.
	Relación y estudios de factibilidad	Cobertura de la red del servicio	En porcentaje de área y de habitantes, y áreas de crecimiento.
	Población y planos	Población histórica	De los últimos tres censos y conteos nacionales.
Técnica	Estadísticas de producción	Volúmenes suministrados al sistema	Resumen mensual, mínimo un año histórico, en metros cúbicos.
		Caudales producidos en las captaciones	Medios anuales, máximos diarios y máximos horarios, para época de verano e invierno en climas extremos.
		Características de los macromedidores	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 tipográficas en cruceros y tipos, ubicación de pozos, bombeos y tanques, válvulas.
		Planos de perfiles de conducciones	Con indicaciones de cambio de diámetro y material; ubicación de válvulas de aire y desfogue.
		Proyectos ejecutivos anteriores	Se puede obtener datos adicionales de planos y mediciones.

	Facturación de energía	Datos generales	Nombres de compañías eléctricas, tensión en volts, tarifa por equipo de bombeo, historial mensual de facturación en un año (demanda máxima, consumo kWh, factor de potencia) horario punta.
Energética	Planos, inventario de equipos y recorrido de campo	Infraestructura electromecánica	Diagrama unifilar (calibre, protecciones, transformadores, motores, capacitores y generadores), acometida (tipo, elemento desconector, apartarrayos, fusibles), subestación eléctrica (tipo, cantidad de transformadores, sistema de tierras), transformadores (identificación, tipo, capacidad nominal kVA, relación de transformación, antigüedad), capacitores (ubicación, capacidad kVAr, tipo de banco, elemento desconector, estado), equipos de medición.
		Sistema electro-motriz	Arrancador (tipo, capacidad en amperios), conductores eléctricos (cantidad de hilos, longitud, calibre, material, tipo de aislamiento), motor eléctrico (marca, tipo, capacidad en HP, tensión de suministro en volts, corriente nominal, número de polos, velocidad a plena carga, factor de servicio, eficiencia nominal, antigüedad, cantidad de rebobinados, temperatura en grados centígrados).
		Sistema hidráulico del equipo de bombeo	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.
Institucional	Informes ejecutivos	Índices de gestión	Indicadores de eficiencia física, hidráulica y energética, tipos, 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	Descripción de funciones, personal e interrelación con otras áreas.
		Programas interinstitucionales	Programas de instituciones locales y estatales.

Es conveniente que la información se encuentre actualizada en la medida de lo posible y de preferencia en formato digital.

Se recomienda verificar su grado de confiabilidad y efectuar recorridos de campo para cotejarla y ratificárla. También es conveniente recurrir a otras bases de datos alternas, tales como Internet o el sistema satelital *Google Earth*, entre otras. Finalmente, es necesario investigar otras fuentes de información en oficinas federales, estatales y municipales.

En el caso de que no se obtengan todos los datos necesarios de los equipos de bombeo por parte de la empresa de agua, deberán ser levantados en el campo, para cada uno de los equipos que se analizarán en la auditoría. En el apéndice del presente documento se encuentran los formatos y el procedimiento detallado para realizar esta actividad.

A continuación, se detallan los datos fundamentales que deberán ser obtenidos o corroborados en el campo.

## DATOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Se deben recopilar los siguientes datos del sistema eléctrico:

**Diagrama unifilar.** Es sumamente importante esquematizar el diagrama unifilar de las conexiones del equipo, la acometida, el cableado, el transformador, el interruptor principal, si tiene arrancador o no.

**Suministro eléctrico.** Se refiere al prestador del servicio eléctrico y los datos correspondientes al contrato con esta compañía. Hay que tener especial cuidado en obtener lo siguiente:

**Suministrador.** Nombre de la empresa que presta el servicio eléctrico.

**Número de servicio.** El número de contrato del recibo o factura eléctrica para este equipo.

**Tarifa contratada.** La clave o nombre del esquema tarifario en el que se encuentra dicho contrato. Se deberá indicar si la medición se realiza en baja o media tensión.

**Transformador.** Recabar los datos más importantes de las características del transformador, a saber:

**Tipo.** El tipo de transformador que alimenta el equipo, o en caso de que la acometida sea a baja tensión, describir los elementos que la alimentan.

**Capacidad.** La capacidad del transformador o de los transformadores, si el suministro se efectúa por medio de más de un transformador; hay que poner la capacidad de kVA de cada uno de ellos.

**Relación de transformación.** Se debe registrar el voltaje de entrada y salida del transformador o la relación de voltaje de transformación en volts separados por una diagonal. En caso de que el transformador tenga más de un voltaje de salida, se deberá registrar el voltaje real con el que funciona actualmente.

**Interruptor principal.** Los datos del interruptor principal del equipo, es decir, el interruptor al que llega la energía proveniente del transformador o la alimentación principal del equipo.

**Marca.** La marca del interruptor o su fabricante.

**Capacidad.** La capacidad nominal del interruptor en amperios (A).

**Ajuste.** Si el interruptor es de tipo ajustable, se debe registrar la capacidad nominal a la que está ajustado en amperios (A).

**Arrancador.** Si el equipo de bombeo cuenta con un arrancador, debe recopilarse la siguiente información:

**Tipo.** Tipo de arrancador. En caso de que sea un dispositivo electrónico, habrá que indicar la marca y el modelo, y los elementos complementarios.

**Capacidad.** Capacidad del arrancador (HP).

**Protección.** Se trata de los datos de la protección de sobrecarga del motor que se encuentra en el arrancador.

**Marca.** Fabricante o marca del elemento térmico de protección del motor.

**Capacidad.** Registrar el rango de calibración del elemento térmico en amperios (A).

**Ajuste.** El punto en que se encuentra calibrado el elemento térmico.

**Capacitores.** Si el equipo cuenta con un banco de capacitores, anotar la capacidad total del banco en kVAr. Se debe identificar el tipo de capacitores y si es propio del equipo o grupo de equipos.

**Sistema de tierras.** Se deberán analizar y registrar las condiciones del sistema de tierras, es decir: si existe o no el sistema de tierra física, si está separado del neutro, si el transformador, arrancador y motor están conectados a dicho sistema, y registrar el calibre del cable con el que se encuentra puesto a tierra el elemento descrito.

**Conductores.** Los datos necesarios se refieren al calibre y a la longitud de los conductores en dos tramos. El primero es el que va desde el punto de alimentación del servicio –ya sea un transformador o una acometida de entrada– hasta el arrancador o interruptor del motor. El segundo tramo para el que se piden los datos de los conductores es el que va desde el arrancador o interruptor del motor hasta el motor. En ambos casos se debe recopilar lo siguiente:

**Calibre.** Es el calibre del conductor ( $\text{mm}^2$ ) o (AWG); este puede obtenerse en el forro del conductor.

**Longitud.** La longitud total de los conductores en el tramo descrito.

**Agrupamiento.** Es la descripción de cómo van agrupados dichos conductores y el medio de canalización utilizado. En particular, indicar cuántos conductores monopolares activos van en el ducto, si los ductos van enterrados o a la vista, y en caso de que vayan enterrados, verificar cuántos ductos de otros equipos acompañan al ducto del equipo en cuestión.

## DATOS NOMINALES DEL MOTOR

Se deberá obtener la información de los datos nominales del motor que se deben leer directamente en las placas de los mismos y de la bitácora de mantenimiento del equipo en estudio. De esta forma se habrán de recabar los siguientes datos:

**Datos de placa nominales.** Esta información se encuentra escrita en la placa del motor, o en su defecto, si la placa es ilegible, se deberá buscar la orden de compra o el documento donde se describan las características del motor del equipo en estudio.

**Marca.** Marca o fabricante del motor.

**Capacidad.** La capacidad nominal del motor (HP).

**Velocidad.** Velocidad de giro del motor (RPM).

**Tensión.** La tensión nominal del motor en volts (V).

**Corriente.** La corriente nominal del motor (A).

**Eficiencia.** La eficiencia nominal especificada por el fabricante (-).

**Tipo.** Tipo de motor.

**Carcasa.** Es el tipo de armazón o número de armazón que tiene el motor.

**F.S.** Es el factor de servicio que también se lee en la placa; cuando no se indica en la placa, el F.S. deberá tener el valor de 1, y señala el porcentaje de sobrecarga de trabajo del motor; un factor mayor que 1 indica que el motor aguanta dicha sobrecarga.

**Sistema de control.** Es el que activa la operación del motor, esto es: si el motor actúa por niveles discretos o continuos. Se deberá indicar a qué proceso pertenece.

**Historial.** Es el historial de mantenimiento del motor; los datos que interesan a los fines de la auditoría energética para el equipo son los siguientes:

**Antigüedad.** La edad o el tiempo que ha trabajado el motor desde su primera instalación en años.

**Operación.** Las horas en promedio de trabajo del motor en un año (hrs/año).

**Cantidad de rebobinados.** El número de rebobinados que se han realizado al motor en la vida de servicio.

## DATOS NOMINALES DE LA BOMBA

En este apartado se deberán describir los datos nominales o de diseño de la bomba, para lo cual será necesario, en caso de que no se tengan los datos en campo o que sea ilegible su placa, contar con los documentos del equipo al momento de la compra. Los datos requeridos son los siguientes:

**Cuerpo.** Datos referentes al cuerpo de la bomba, entre ellos:

**Marca.** Marca o fabricante de la bomba.

**Tipo.** Tipo de bomba: sumergible, turbina vertical, horizontal, centrífuga, etc.

**Modelo.** El modelo de bomba de acuerdo con el fabricante.

**Antigüedad.** La edad o el tiempo que el equipo ha estado en operación, desde su instalación, en años.

**Impulsor.** Los datos correspondientes al impulsor de la bomba y que deben obtenerse son:

**Tipo.** El tipo de impulsor de la bomba.

**Material.** El material con el que está fabricado el impulsor.

**Diámetro.** El diámetro nominal del impulsor (m).

**Antigüedad.** La edad del impulsor o el tiempo que el impulsor ha estado en operación (años) Cabe señalar que el impulsor podría tener una antigüedad diferente de la de la bomba, si este elemento ha sido cambiado durante la vida de la bomba.

**Flecha.** Los datos de la flecha de transmisión entre el motor y la bomba incluyen:

**Diámetro.** El diámetro de la flecha (pulgadas).

**Longitud.** La longitud de la flecha (m).

**Datos de diseño.** Son las características hidráulicas de diseño del equipo de bombeo, y que de acuerdo con el modelo del fabricante se describen en el punto de operación óptima de la bomba de la curva característica, con los siguientes datos:

**Carga.** La carga de diseño en metros de columna de agua (mca).

**Gasto.** El gasto de diseño en litros por segundo (l/s).

**Características del fluido.** Se refiere a las características principales del fluido a bombeo, las que dependerán si se trata de agua potable o agua tratada. Los datos que se deberán obtener son los siguientes:

**Fluido.** Descripción del fluido: agua potable, agua tratada u otro.

**Temperatura.** Temperatura de trabajo o temperatura media a la que se encuentra el fluido en grados centígrados (°C).

**Peso específico.** El peso específico del fluido a bombeo ( $\text{kg/m}^3$ ).

**Observaciones.** Describir cualquier condición particular del fluido que se está bombeando.

La obtención de estos datos es de suma importancia para realizar el análisis y el balance de energía de los equipos en estudio. La recopilación de estos datos en campo debe realizarse al mismo tiempo que las mediciones de campo, que se describen en el capítulo siguiente.

En la primera sección del apéndice, se muestra el formato donde deberán ser vaciados estos datos.

## Capítulo 5

### MEDICIONES DE CAMPO

Una vez obtenidos los datos básicos, y con la información proporcionada, se debe planear y ejecutar una campaña de medición de parámetros eléctricos e hidráulicos para realizar la auditoría de la instalación electromecánica en los sistemas de bombeo.

Con base en el resultado de esas mediciones se determina:

- La eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba y de ambos elementos en forma separada.
- Las curvas de comportamiento carga-gasto-eficiencia del equipo de bombeo.

La campaña de medición está dividida en actividades hidráulicas y en trabajos electromecánicos en equipos de bombeo, como se muestra en el cuadro 5.1.

**CUADRO 5.1** Descripción de la campaña de medición

Campaña de medición	Actividad	Objetivo	Equipo y herramientas
Electromecánica en equipos de bombeo	Medición de parámetros eléctricos	Determinar potencia de operación y calcular eficiencia	Analizador de potencias de redes eléctricas o equipos de medición (voltímetro, amperímetro, etc.)
	Medición de caudal de descarga en bombas	Determinar el caudal de operación del equipo	Medidor de gasto ultrasónico o electromagnético
	Medición de presiones en descarga	Obtener carga de operación del equipo	Manómetro portátil tipo Bourdon
	Definición de niveles de referencia en bombeos	Obtener carga de operación y pérdidas de carga hidráulica	Sonda eléctrica, cinta métrica, etc.

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

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

Enseguida se detallan algunas recomendaciones importantes para efectuar las mediciones, obtener mejores resultados en el registro de datos, y evitar costos y tiempos excesivos. En el apéndice de la presente publicación se encuentran los formatos y el procedimiento detallado para realizar esta tarea.

### MEDICIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS

Todas las mediciones deben ser realizadas durante operación normal y solo por personal técnico capacitado que debe seguir los procedimientos internos de seguridad y las condiciones y prácticas descritas abajo para prevenir accidentes.

## **Condiciones**

- Evaluar el entorno antes de tomar la medición.
- No trabajar solo en áreas peligrosas.
- Usar equipo de protección individual adecuado según las recomendaciones locales de salud y seguridad.
- Asegurar que el instrumento de prueba este clasificado para el medio ambiente de medición.
- Conocer y saber utilizar el equipo antes de cualquier medición.

## **Prácticas**

- Medir en el punto de tensión más bajo. Por ejemplo, midiendo la tensión en un panel de interruptores, identificar el interruptor de menor voltaje posible, para realizar la medición.
- Mantener la mirada en el área de medición y mantener las manos libres si las circunstancias lo permiten.
- Para una sola fase, conectar neutro primero y fase segundo. Después de tomar lectura, desconectar fase primero y neutro segundo.
- En las pruebas de tensión, utilizar el método de tres puntos de prueba.
  1. Realizar una prueba en un circuito similar y conocido.
  2. Realizar la medición en circuito a medir.
  3. Volver a realizar una prueba en el primer circuito.

Este proceso verifica que el instrumento de prueba está funcionando correctamente.

- Al realizar mediciones en alta tensión de tres fases, usar sondas de prueba con una mínima cantidad de la punta de metal expuesta de 0,12" (4 mm). Esto reduce el riesgo de un arco eléctrico accidental entre las puntas de prueba.
- Reducir la posibilidad de cortocircuito con las manos, haciendo la medición con una sola mano de ser posible. Al hacer las mediciones no tocar ninguna estructura conectada a tierra al mismo tiempo.

Los parámetros eléctricos a medir son:

- a) Tensión eléctrica (voltaje).
- b) Corriente eléctrica (A).
- c) Factor de potencia (%).
- d) Potencia real o activa (kW).
- e) Potencia reactiva (kVar).

En estos casos, resulta indispensable la utilización del equipo de medición adecuado (voltímetro, amperímetro, vatímetro, multímetro, etc.). Se deberá hacer una descripción de los equipos a emplear antes de describir cómo se realiza la medición.

Para simplificar el proceso de medición, se recomienda utilizar un analizador de redes eléctricas 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).

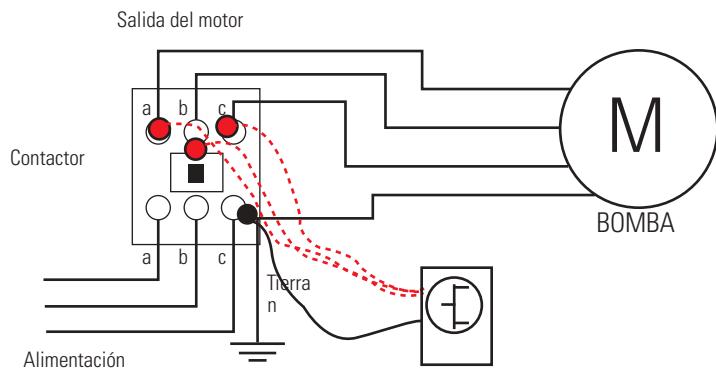
### ***Medición de la tensión eléctrica (voltaje)***

Para realizar la medición de la tensión eléctrica en equipos de bombeo, es necesario utilizar un voltímetro, teniendo como referencia el gráfico 5.1, 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. En el caso de la medición de tensión eléctrica entre fases, se debe repetir el procedimiento anterior colocando a la salida del contactor el cable rojo del voltímetro en la punta “a” y el cable negro en la punta “b”; después entre “a” y “c”; por último entre “b” y “c”.
7. 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. Es razonable definir porcentajes de valores de variaciones máximas y mínimas aceptables.

**GRÁFICO 5.1** Medición de la tensión (voltaje) en equipos de bombeo



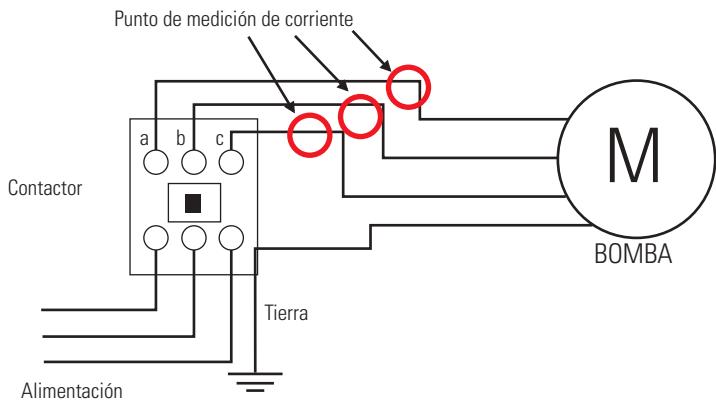
Nota: el gráfico solo se aplica a partida directa, por lo que deberá ajustarse a cada situación, considerando mediciones con un partidor estrella triángulo, partidor suave o variador.

#### **Medición de la corriente eléctrica**

La medición de la corriente eléctrica se efectúa con un amperímetro. El procedimiento de medición se efectúa de la manera siguiente (véase el gráfico 5.2):

- 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 el 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 ( $I_{tt}$ ).
- b) En caso de utilizar un analizador de redes, no será necesario realizar las lecturas de corriente eléctrica en forma individual, sino que habrá que colocar los tres amperímetros simultáneamente en cada uno de los cables que salen del contactor y alimentan el motor. Así, la lectura de la corriente eléctrica de cada cable se obtiene directamente en la pantalla del analizador.

## GRÁFICO 5.2 Medición de corriente eléctrica en equipos de bombeo



Nota: el gráfico solo se aplica a partida directa, por lo que deberá ajustarse a cada situación particular, considerando mediciones con un partidor estrella triángulo, partidor suave o variador.

### Medición del factor de potencia y cálculo de la potencia eléctrica

La medición del factor de potencia (FP) se puede realizar de la misma manera que la medición de corriente o la de tensión, usando además una resistencia similar a la que tienen las parrillas eléctricas. Este método es muy práctico porque en ocasiones no se tiene un vatímetro a mano. De esta forma, el valor del FP se obtiene utilizando solo el amperímetro o el voltímetro y aplicando las fórmulas matemáticas de ley de los senos y cosenos.

### Potencia real o activa

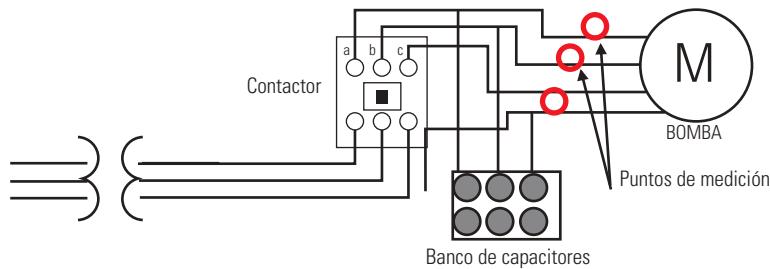
Para medir la potencia real se utiliza un vatímetro, el cual se coloca a la salida del contactor en los cables que van hacia el motor. El procedimiento para realizar la medición del valor de la potencia real o activa es el siguiente:

- 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".

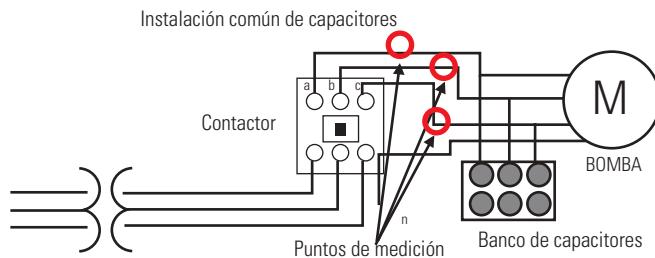
Si el equipo de bombeo tiene instalado un banco de capacitores, se sugiere hacer dos mediciones (véanse los gráficos 5.3 y 5.4):

- 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.
- 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.

**GRÁFICO 5.3** Medición de la potencia real después de los capacitores



**GRÁFICO 5.4** Medición de la potencia real antes de los capacitores



Nota: los gráficos 5.3 y 5.4 solo se aplican a partida directa, por lo que deberán ajustarse a cada situación particular, considerando mediciones con un partidor estrella triángulo, partidor suave o variador.

## MEDICIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Como en el caso de la medición de parámetros eléctricos, para la medición de los parámetros hidráulicos se deberá contar con los equipos de medición calibrados y en buenas condiciones de uso. Asimismo, cuando se efectúan las mediciones, el sistema no debe tener perturbaciones. En el caso de instalaciones unitarias, como pozos o equipo de bombeo, 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 frente a carga hidráulica total de bombeo ( $Q-H_b$ ) se construye con 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:

- a) Medición del caudal a la descarga en la bomba ( $Q$ ).
- b) Medición de la carga de presión de operación, en la succión ( $P_s$ ) y descarga ( $P_d$ ).
- c) Definición del nivel de referencia ( $N_r$ ).
- d) Medición del nivel dinámico de succión ( $N_s$ ).
- e) Medición de niveles a centros de manómetros ( $D_{r-m}$ ), tanto en la succión como en la descarga según el caso explicado más adelante.

### **Medición del caudal a la descarga de la bomba**

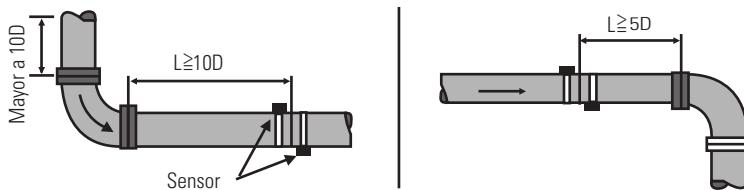
La medición de caudales se realiza en cada una de las captaciones productoras de agua para la red, tales como pozos, manantiales, presas, galerías filtrantes, etc. Esta debe efectuarse exactamente en la tubería donde ingresa el agua a la red de distribución. Asimismo, en los casos de potabilizadoras, tanques o bombeos, 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.

Cuando no existe macromedidor en la captación, se recomienda utilizar un medidor portátil del tipo ultrasonico 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 (véase el gráfico 5.5). Sin embargo, actualmente hay en el mercado medidores que pueden reducir estas distancias, las cuales se pueden consultar en los respectivos catálogos del fabricante.

**GRÁFICO 5.5** Posición del medidor de caudal



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 prueba esté completamente llena en toda su sección. También, para garantizar la medición adecuada, deberá evitarse colocar el medidor en aquellos tramos donde existan burbujas de aire o sólidos en suspensión.

La medición de caudal suministrado se efectúa en un período corto, del orden de 15 a 30 minutos. Si no se detectan variaciones de caudal de +/- 5%, 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.

En el caso de instalaciones electromecánicas con una batería de varios equipos, como por ejemplo los bombeos, 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.

### **Medición de las 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 de que se use en el tercio medio de su escala, puesto que es donde tiene una óptima exactitud. La manera de efectuar la medición se muestra en la fotografía 5.1.

**FOTOGRAFÍA 5.1** 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 (mca), aunque los manómetros suelen tener escalas de  $\text{kg/cm}^2$  o  $\text{lb/pulgada}^2$ . Las equivalencias de estas unidades son las siguientes:

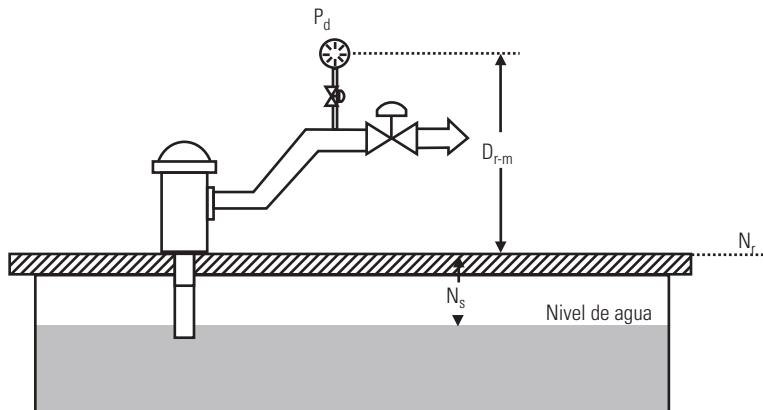
- $1 \text{ kg/cm}^2 = 10 \text{ mca}$
- $1 \text{ lb/pulgada}^2 = 0,7031 \text{ mca}$

Las mediciones de presión de succión y descarga deberán hacerse lo más cerca posible de la bomba. En caso de que no se pueda 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. Es indispensable realizar la medición de la presión en la descarga.

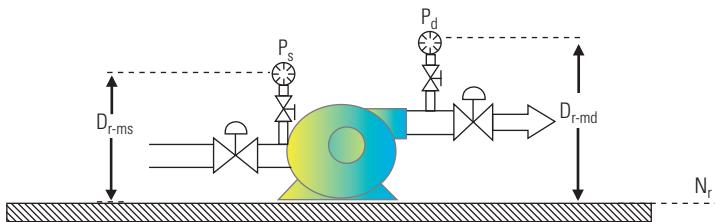
### **Definición del nivel de referencia**

Para el cálculo de la carga hidráulica total de bombeo es conveniente definir un nivel de referencia a partir del cual se medirán los otros niveles. Normalmente el nivel de referencia se ubica sobre la placa base de montaje del motor, como se observa esquemáticamente en los gráficos 5.6 y 5.7.

**GRÁFICO 5.6** Medición de niveles en caso de tener únicamente manómetro en la descarga

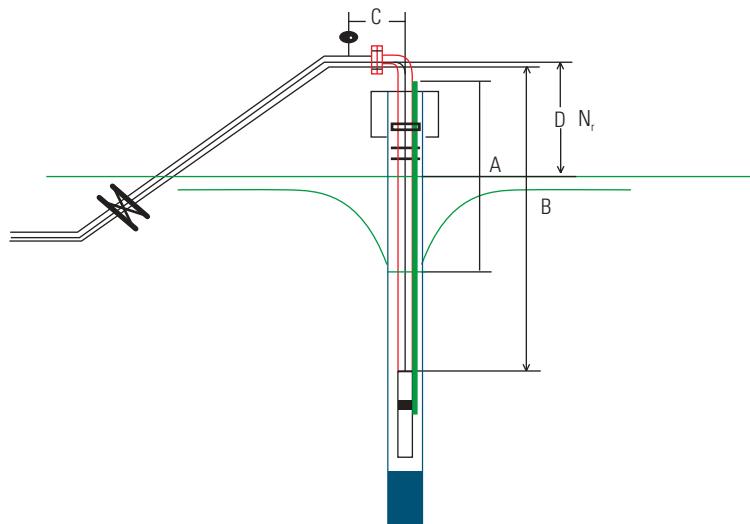


**GRÁFICO 5.7** Medición de niveles en caso de contar con manómetros en succión y descarga



En el caso de equipos de bombeo sumergibles, el nivel de referencia es normalmente el nivel de piso, como se observa en el gráfico 5.8.

**GRÁFICO 5.8** Medición de niveles en equipos sumergibles



### **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, de acuerdo con 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 corresponderá a su nivel dinámico en el acuífero. En las imágenes de la fotografía 5.2 se muestra la medición de nivel dinámico con una sonda eléctrica.

**FOTOGRAFÍA 5.2** Medición del nivel dinámico de succión en cárcamos de bombeo



**FOTOGRAFÍA 5.3** Medición del nivel dinámico en cárcamos de bombeo



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 con las mediciones de caudal, presión y parámetros eléctricos. El valor podrá ser negativo o positivo, lo cual depende de si el nivel se encuentra por debajo o por encima del nivel de referencia.

### **Medición de niveles a centros de manómetros**

En los gráficos 5.6 y 5.7 presentados anteriormente 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  $D_{r-ms}$ .

### **Determinación de la carga hidráulica de bombeo**

Las mediciones de presión y niveles descritos en los apartados anteriores 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 del arreglo que se tenga. En el cuadro 5.2 se describen el proceso de cálculo y los parámetros a considerar en la determinación de la carga hidráulica total de bombeo de acuerdo con el tipo de equipo y la aplicación en turno.

**CUADRO 5.2** Proceso de cálculo para la carga hidráulica de bombeo ( $H_b$ ) y parámetros a medir

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

### **FORMATO DE REGISTRO DE DATOS EN CAMPO**

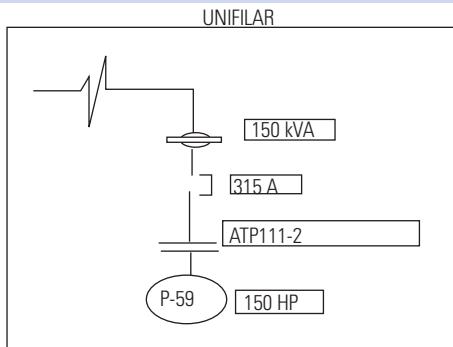
Es importante el uso de formatos de campo organizados para registrar tanto las características del sistema electromecánico de los equipos de bombeo como sus valores nominales y los datos obtenidos en las campañas de medición de los mismos. En el cuadro 5.3 se muestra un ejemplo del formato sugerido para el registro de las características del sistema electromecánico y los datos nominales tanto de la bomba como del motor. En el cuadro 5.4 se presenta un formato que puede utilizarse en las mediciones de variables hidráulicas y eléctricas de los equipos de bombeo.

**CUADRO 5.3** Formato para el registro de datos nominales y características del sistema electromecánico

**DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO A EQUIPOS DE BOMBEO**

Lugar:	Durango, Dur.
Fecha:	11 de febrero de 2008

<b>Organismo:</b>	AGUAS DEL MUNICIPIO DE DURANGO		
<b>Sistema:</b>	Azcapotzalco	<b>Equipo:</b>	Pozo No 59
<b>SISTEMA ELÉCTRICO</b>			
<b>SUMINISTRO ELÉCTRICO:</b>	Suministrador: CFE No. de servicio: Tarifa contratada		
<b>TRANSFORMADOR:</b>	Tipo: OA Costa Capacidad: 150 kVA Ref. de transf.: 13.2/440/254 V.		
<b>ARRANCIADOR:</b>	Tipo: ATP111-2 Capacidad: 150 HP		
<b>CONDUTOR ELÉCTRICO:</b>	Calibre: 3/0 AWG 1HXF-3F Longitud: 3,5 m		
<b>CAPACITORES:</b>	Capacidad: 20 kVAr		
<b>OBSERVACIONES:</b>			
<b>MOTOR ELÉCTRICO</b>			
<b>DATOS DE PLACA O NOMINALES:</b>	Tensión: 460 V	Tipo: RU	
Marca: US	Corriente: 163 A	Frame: _____	
Capacidad: 150 HP	Eficiencia: 92,4%	F.S.: 1.15	
Velocidad: 1775 RPM			
<b>HISTORIAL:</b>			
Antigüedad: 12 años	Operación: 8760 hrs/año	# de rebobinados: 4	
<b>OBSERVACIONES:</b>	Motor sobre superficie		
<b>EQUIPO DE BOMBEO</b>			
<b>CUERPO:</b>	<b>IMPULSOR:</b>		
Marca: S/M	Tipo: Semiabierto		
Tipo: T.Vertical	Material: Bronce		
Modelo: 12-6	Diámetro: m		
Antigüedad: 12 años	Antigüedad: 12 años		
<b>DATOS DE DISEÑO:</b>	Carga: 108 mca	Gasto: 60 lps	
<b>OBSERVACIONES:</b>			
<b>CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO A BOMBEAR:</b>			
Fluido: Agua potable	Temp: 24	Viscosidad: 0,85 Centipoise	
Observaciones:			



**CUADRO 5.4** Formato para el registro de mediciones de variables hidráulicas y eléctricas de equipos de bombeo

MEDICIONES HIDRÁULICAS		
<b>NIVELES:</b>		
Nivel del depósito de succión (A):	92 m	Longitud de la tubería en succión (B):
Longitud de la tubería en descarga (C):	4 m	Altura del manómetro de descarga (D):
		128 m 0,4 m

**LÍNEA DE SUCCIÓN:**

Diámetro: 0,203 m Material: AC. C40 Lectura de manómetro: kg/cm<sup>2</sup>

**LÍNEA DE DESCARGA:**

Diámetro: 0,203 m Material: AC. C40 Lectura de manómetro: 1,3 kg/cm<sup>2</sup>  
Gasto: 35,0 lps

**MEDICIONES ELÉCTRICAS**

**TENSIÓN ENTRE FASES:**

Vab: 251 Vbc: 256 Vca: 251

**CORRIENTE POR FASE:**

Ia: 108 Ib: 126 Ic: 115

**POTENCIA ACTIVA:**

Pa: 25 Pb: 30 Pc: 27

**FACTOR DE POTENCIA:**

FPa: 0,92 FPb: 0,94 FPC: 1

Incluye el efecto del banco de capacitores? (Sí o NO)

**RESPONSABLE**

Levantamiento de datos:

Moisés Romero González

Mediciones:

Carlos Morales Zamora, Moisés Romero González

Supervisión y análisis

Ing. Ramón Rosas Moya/Ing. Arturo Pedraza

**MEDICIONES DE TEMPERATURA**

Las mediciones de temperatura son importantes, ya que pueden brindar información adicional sobre el comportamiento, la operación y las acciones de mantenimiento que deberán ser realizadas en el sistema eléctrico del equipo de bombeo. Se recomienda indicar los equipos mínimos para la medición de temperatura; idealmente sería adecuado tener una cámara térmica para medir esta variable. Además, se deben incluir recomendaciones.

Se deberán tomar mediciones de temperatura en los siguientes elementos:

**En el equipo de control.** Las mediciones de temperatura en el equipo de control se realizan para determinar una 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 una 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 de salida que van hacia el motor en el arrancador, en cada una de sus fases (A, B, y C).

**En el motor.** La medición de temperatura en el motor puede determinar falta de mantenimiento del mismo, una sobrecarga o rozamiento o inestabilidad de las flechas, cuando al realizar esta medición se observan diferenciales grandes de temperatura entre las partes. 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 y al final de la flecha.

**En el transformador.** Al igual que en el equipo de control, las mediciones de temperatura se realizan para determinar una 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 también la falta de mantenimiento del transformador. Para esto deberá efectuarse una medición de temperatura en los siguientes elementos del transformador:

**Bornes del 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 precisar 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 parte inferior del radiador. Esta medición determina de manera indirecta el diferencial de temperatura del aceite del transformador.



## Capítulo 6

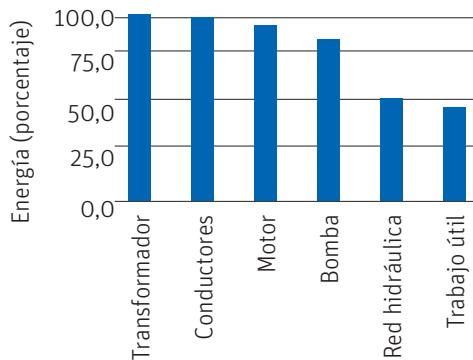
### ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA

El siguiente paso es realizar la evaluación y el análisis de los datos obtenidos y de las mediciones realizadas. Esta evaluación tendrá por objeto principal determinar las pérdidas energéticas y la eficiencia de los distintos componentes del sistema de bombeo mediante una auditoría de eficiencia energética, lo que dará como resultado el balance de energía.

#### PÉRDIDAS ENERGÉTICAS EN SISTEMAS DE AGUA

Dentro de las instalaciones del sistema de agua potable, puede observarse la distribución típica de pérdidas de energía según se muestra en el gráfico 6.1.

**GRÁFICO 6.1** Pérdidas energéticas típicas en los componentes electromecánicos de un sistema de agua



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 el 40% y el 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 del 40%-45% precisamente se encuentran las oportunidades que se exploran más adelante como producto de la optimización de la operación hidráulica, y es allí donde también se presentan oportunidades de ahorro de energía importantes.

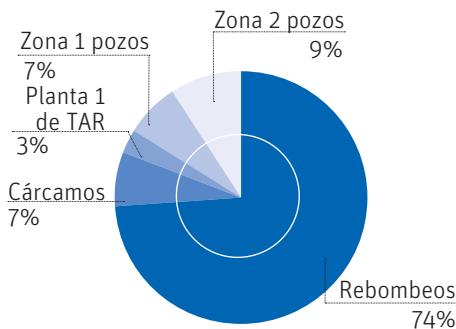
## BALANCE DE ENERGÍA DEL SISTEMA

Al inicio de la auditoría de eficiencia energética se recomienda analizar la distribución del consumo de energía a lo largo del sistema en evaluación. Esto es conocido como análisis del balance de energía.

Para realizar el balance de energía del sistema, se deben sumar los consumos de energía de todas las instalaciones que lo componen (pozos, plantas de tratamiento y bombeos) para obtener el porcentaje de consumo en cada uno de ellos respecto al total de energía del sistema.

Con el balance se identifican las instalaciones de mayor consumo de energía dentro del sistema para la planeación de la Auditoría Energética. En el gráfico 6.2 se muestra un balance típico en un sistema de agua potable y saneamiento.

**GRÁFICO 6.2** Descripción gráfica del balance de energía del sistema



## ASPECTOS A EVALUAR EN UNA AUDITORÍA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Basado en la distribución de pérdidas descrita anteriormente, la auditoría energética (AE) en un sistema de agua potable debe incluir el análisis de los sistemas típicos donde se consume la energía, que en orden de importancia son los siguientes:

- Suministro eléctrico, lo que incluye las características del contrato de suministro.
- Sistema electromotriz, incluido el transformador.
- Conjunto motor-bomba, lo que incluye eficiencias, condiciones de operación y aspectos de mantenimiento.

Es importante hacer notar que, aunque existen muchas perspectivas para analizar los sistemas eléctricos, para los fines de la AE, se debe enfatizar el análisis de los aspectos que mayormente incidan en el consumo energético.

En este capítulo se describen las características más importantes y los principales aspectos a evaluar, así como también la metodología de cálculo a aplicar durante la auditoría de eficiencia energética de cada componente de la cadena energética de una instalación típica de los sistemas de agua potable y saneamiento, lo que será útil para el desarrollo de la cartera de proyectos de ahorro de energía posterior.

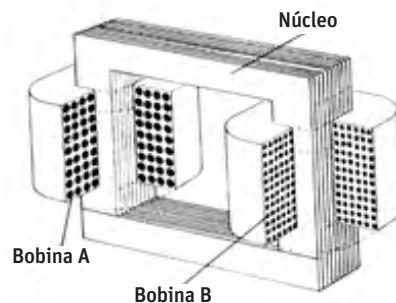
## CÁLCULO DE PÉRDIDAS ELÉCTRICAS EN CONDUCTORES Y TRANSFORMADORES

### Cálculo de pérdidas en el transformador

La subestación eléctrica es el espacio donde se aloja el primer elemento de acondicionamiento del suministro eléctrico hacia el sistema electromecánico dentro de las instalaciones; se trata del transformador eléctrico, el cual tiene la función de reducir la tensión de la red a los valores que requieren los equipos.

**FOTOGRAFÍA 6.1** Componentes típicos de una subestación

**GRÁFICO 6.3** Detalle de componentes típicos de una subestación



Los principales aspectos a observar y evaluar durante la auditoría de eficiencia energética son las condiciones de operación del transformador eléctrico y las pérdidas energéticas por disipación en sus componentes.

**A. Evaluación de pérdidas.** Las pérdidas en un transformador son de dos clases: pérdidas en el entrehierro (núcleo) y pérdidas en el embobinado (cobre).

Las pérdidas en el núcleo ( $P_{Fe}$ ) son aquellas que se generan en el núcleo ferromagnético debido a dos factores fundamentales: la energía mínima de magnetización y las corrientes parásitas que circulan por el núcleo debidas al flujo magnético presente y a fallas en el material ferromagnético. Estas pérdidas son independientes de la carga a la que es sometido el transformador, y prácticamente invariables a la tensión y frecuencia constantes. Es un dato que normalmente suministra el proveedor.

Las pérdidas en el cobre ( $P_{Cu}$ ) son las que se generan en los devanados del transformador, al circular las corrientes por los mismos. Su valor está determinado por el cuadrado de la corriente y la resistencia eléctrica de los devanados; estas pérdidas están directamente relacionadas con el factor de potencia.

Las pérdidas totales son iguales a las pérdidas en el núcleo más las pérdidas en el cobre a plena carga, corregidas por el índice de carga (la potencia a la carga dividida por la potencia a plena carga) al cuadrado. A continuación se presenta la fórmula para el cálculo de las pérdidas totales:

$$P_{tot} = P_{Fe} + P_{Cu} * [P_{rt} (kW) / (FP * P_n (kVA))]^2$$

Donde:

$P_{tot}$  = pérdidas totales (kW).

FP = factor de potencia (-).

$P_{Fe}$  = pérdidas en el cobre a tensión nominal (kW).

$P_{Cu}$  = pérdidas en el núcleo a tensión nominal (kW).

$P_n$  = potencia nominal del transformador en evaluación (kVA).

$P_{rt}$  = potencia real considerando todas las cargas alimentadas por el transformador (kW).

En el cuadro 6.1 se detallan las pérdidas  $P_{Fe}$  y  $P_{Cu}$  a carga nominal para transformadores de capacidades nominales comerciales para fines de evaluación práctica durante la auditoría de eficiencia energética, en caso de que el transformador no cuente con sus datos de fabricante específicos.

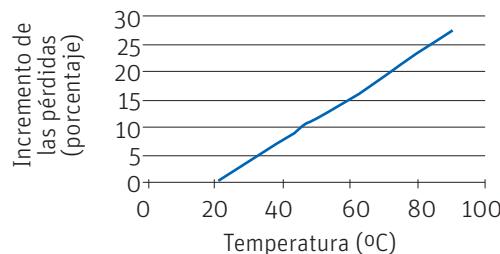
**CUADRO 6.1** Pérdidas en un transformador eléctrico en función de su capacidad nominal

Potencia nominal (kVA)	Pérdidas en el hierro (W)	Pérdidas en el cobre a potencia nominal (W)
25	195	670
50	345	810
75	400	1.080
100	435	1.085
125	480	2.350
160	490	2.600
200	570	3.400
250	675	4.230
315	750	5.250
400	900	6.200
500	1.000	8.050
630	1.250	9.000
800	1.690	10.800
1.000	1.800	12.600
1.250	2.010	16.800
1.600	2.500	19.000
2.000	2.750	23.900
2.500	3.480	29.600
3.150	3.500	30.500
4.000	4.300	34.000
5.000	5.000	39.500
6.300	6.300	45.000
8.000	7.000	57.000
10.000	7.600	68.500

Como es obvio, las pérdidas están directamente relacionadas con el factor de potencia; por ende, para reducirlas es necesario trabajar con un factor de potencia cercano a la unidad.

**B. Inspección de la temperatura de operación.** El otro factor que incrementa el nivel de pérdidas es la ineficiente remoción de calor, que se refleja en una alta temperatura de operación por mal funcionamiento en el sistema de enfriamiento. El nivel de pérdidas en función de la temperatura se muestra en el gráfico 6.4.

**GRÁFICO 6.4** Pérdidas en transformadores en función de la temperatura



### Análisis del factor de potencia

La gran mayoría de los equipos eléctricos, particularmente los motores eléctricos tipo jaula de ardilla de inducción que son los utilizados en los sistemas de agua y saneamiento, consume tanto potencia activa o de trabajo  $P_a$  (kW), que es la potencia que el equipo convierte en trabajo útil, como potencia reactiva o no productiva  $P_r$  (kVAr), que es la que proporciona el flujo magnético necesario para el funcionamiento del equipo, pero que no se transforma en trabajo útil. La suma de ambas se conoce como potencia total aparente  $S$  (kVA).

Ambos valores se miden durante la campaña de medición de parámetros eléctricos descrita anteriormente.

### Causas y efectos del bajo factor de potencia

Un deterioro del factor de potencia (FP) ocasiona un incremento de la corriente, la cual a su vez eleva las pérdidas en el sistema, entre las que se destacan:

a) Aumento de las pérdidas por efecto Joule, que se producen en función del cuadrado de la corriente y se manifestarán en:

- Los conductores entre el medidor y el usuario.
- Los embobinados de los transformadores de distribución.
- Los dispositivos de operación y protección.

b) Una caída de voltaje en las líneas de alimentación, lo que se relaciona con:

- Un incremento en la corriente demandada, con lo que se reduce la capacidad de carga instalada. Esto es importante en el caso de los transformadores de distribución.
- Un incremento de las pérdidas Joule en la líneas de alimentación. Estas pérdidas afectan al productor y distribuidor de energía eléctrica, por lo cual se penaliza al usuario haciendo que pague más por su electricidad.

La tarea durante la auditoría de eficiencia energética con respecto al análisis del FP consistirá en lo siguiente:

**A.** En caso de que la empresa suministradora mida el FP y aplique un costo o bonificación por alto o bajo FP, registrar el valor estadístico de FP durante el período de análisis que se evalúa, en conjunto con la estadística de facturación, para determinar el comportamiento en el tiempo del FP y su impacto en el costo.

**B.** 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 real y potencia reactiva real obtenidos durante las mediciones. La manera de efectuar el cálculo es la siguiente:

$$FP = \frac{Pa}{\sqrt{(Pa^2 - Pr^2)}}$$

Donde:

FP = factor de potencia (-).

Pa = potencia activa medida (kW).

Pr = potencia reactiva medida (kVAr).

También puede calcularse tomando estos valores del medidor del suministrador.

**C.** Observar las instalaciones para ver si cuentan con algún sistema para compensar el FP, generalmente capacitores, y dónde se encuentran instalados.

### **Cálculo de pérdidas en conductores eléctricos**

Al conjunto integrado por conductores, transformadores de control, protecciones, arrancadores, controladores y demás elementos que suministran energía a los equipos que transforman energía eléctrica en energía mecánica (motores), se los conoce con el nombre de sistemas electromotrices.

En la fotografía 6.2 se muestran sistemas electromotrices y sus componentes.

**FOTOGRAFÍA 6.2** Componentes típicos del sistema electromotriz de un sistema de bombeo



A continuación se describen los principales aspectos a observar y evaluar durante la auditoría de eficiencia energética en estos componentes.

Del conjunto de estos sistemas, donde se debe tener mayor cuidado en la verificación y relevación de datos durante la auditoría de eficiencia energética es en los conductores eléctricos.

Los conductores se comportan como una resistencia pura; esto es, absorben potencia de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P = R * I^2$$

Donde:

P = pérdidas por efecto Joule (W).

R = resistencia del conductor expresada ( $\Omega$ ).

I = corriente que circula en el conductor (A).

Asimismo, esta resistencia genera una caída de voltaje que se calcula en función de la corriente.

La evaluación energética, como parte de la auditoría de eficiencia energética, consiste en calcular las pérdidas en el conductor, con el método que se ilustra en el siguiente ejemplo.

**Ejemplo:** Calcular las pérdidas en un conductor eléctrico que alimenta un motor de 150 A conectado a un equipo de bombeo sumergible. El calibre del conductor instalado es de 1/0 con 4 hilos a 440 V como indica la norma internacional. La distancia del cable es de 130 m. Se trata de seleccionar el calibre óptimo del conductor eléctrico, para alimentar a un equipo de bombeo que demanda 150 amperios a 440 V.

En el cuadro 6.2 se presentan el cálculo de pérdidas y la caída de voltaje para diferentes calibres de conductor, y las pérdidas para esta distancia y amperaje específicos.

**CUADRO 6.2** Resistencia para diferentes calibres de conductor y caída de voltaje para el ejemplo en desarrollo

Calibre	Resistencia			$\Delta V$	
	Ohms/km L (km)	Ohms	Volts	Porcentaje	
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

Con estos valores se calculan las perdidas energéticas trabajando 6.000 horas al año y un índice de costo energético de 1,4 \$/kWh promedio, de acuerdo con el procedimiento descrito en el cuadro 6.3.

**CUADRO 6.3** Cálculo de pérdidas energéticas por efecto Joule finales para el ejemplo en desarrollo

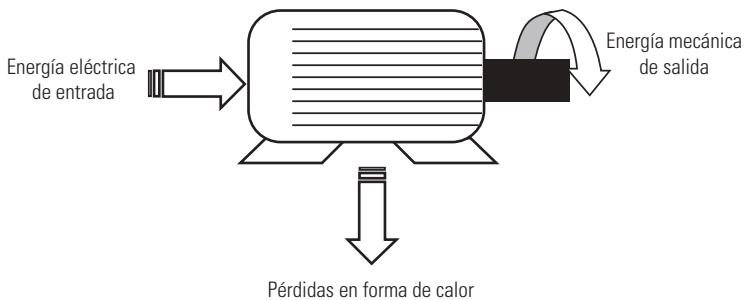
Tensión (V) =	440 V
Corriente (I) =	150 A
Caída de tensión ( $\Delta V/I$ ) =	6.424 V 1,5%
Resistencia ( $R = \Delta V/I$ ) =	0,0428 $\Omega$
Pérdidas ( $P_J = I^2 \times R$ ) =	963,6 watts 0,9636 kW
Operación =	6.000 h/año
Pérdidas de energía =	5.782 kWh/año 7.909,23 \$/año

Nota: nótese que el cálculo anterior no considera el efecto que tiene la temperatura en la resistencia, y que la corriente tiene el efecto de incrementar la temperatura del cable.

## CÁLCULO DE PÉRDIDAS Y EFICIENCIA DEL MOTOR

Los motores eléctricos son los equipos encargados de convertir la energía eléctrica en energía mecánica giratoria que se transfiere a la carga cualquiera que esta sea. En el gráfico 6.5 se puede observar el flujo de energías correspondiente a un motor eléctrico.

**GRÁFICO 6.5** Flujo de energías en un motor eléctrico



En el caso de los sistemas de agua, la carga típica la constituyen los sistemas de bombeo, aunque también existen otro tipo de cargas como los ventiladores, sopladores, agitadores y transportadores usados en las plantas de tratamiento de agua residual y potabilizadoras.

Del universo de motores eléctricos, el más popular de todos es sin duda el motor de inducción, debido a su gran versatilidad y bajo costo; es por lo tanto el de mayor aplicación tanto a nivel industrial como doméstico, y por supuesto en los sistemas de bombeo centrífugo se lo utiliza casi universalmente para el bombeo de agua municipal. Quizás hasta se haya exagerado un poco en su aplicación, al grado que, debido a su bajo costo, en muchos casos no se han aprovechado adecuadamente sus grandes cualidades y se han propiciado usos sumamente ineficientes en algunas de sus aplicaciones.

## Pérdidas típicas en un motor eléctrico

En general, las pérdidas de un motor eléctrico pueden desglosarse como sigue:

- a) Pérdidas eléctricas (en el estator y el rotor) (varían con la carga).
- b) Pérdidas en el hierro (núcleo) (esencialmente independientes de la carga).
- c) Pérdidas mecánicas (fricción y turbulencia del viento) (independientes de la carga). Las pérdidas mecánicas ocurren en los cojinetes, los ventiladores y las escobillas (cuando se usan) del motor.
- d) Pérdidas de carga por dispersión (dependientes de la carga). Estas pérdidas están constituidas por varias pérdidas menores que provienen de factores como la pérdida de flujo inducido por las corrientes del motor, la distribución no uniforme de la corriente en el estator y los conductores del rotor, el entrehierro y así sucesivamente. Estas pérdidas combinadas llegan a constituir hasta el 10%-15% de las pérdidas totales del motor y tienden a aumentar con la carga.

En condiciones normales de tensión y frecuencia, las pérdidas mecánicas y magnéticas se mantienen prácticamente constantes, independientemente de la carga impulsada; no así las pérdidas eléctricas que varían con la potencia exigida en la flecha.

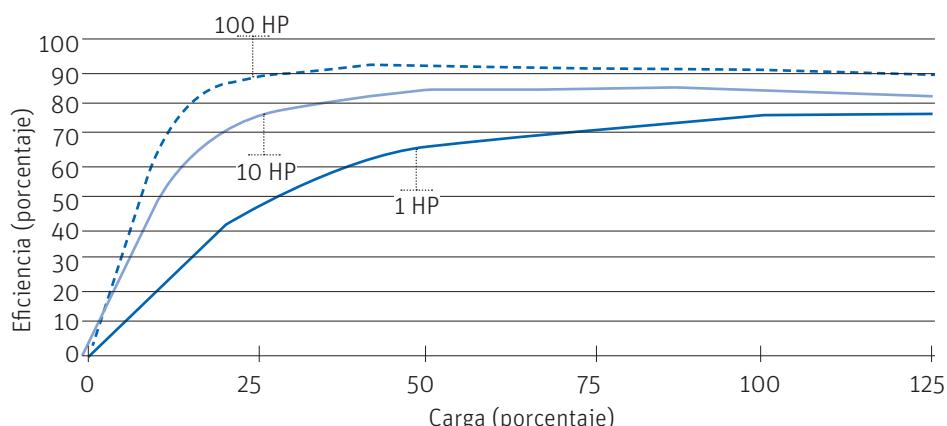
## Evaluación de la eficiencia de los motores

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 un porcentaje de la relación de potencia mecánica entre la potencia eléctrica.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia mecánica}}{\text{Potencia eléctrica}} \times 100$$

Todas las pérdidas descritas influyen en el valor real de la eficiencia de un motor en operación, pero de manera general se sabe que la máxima eficiencia ocurre cuando operan entre el 75% y el 95% de su potencia nominal, disminuyendo ligeramente cuando se incrementa y de manera significativa si se reduce. En el gráfico 6.6 se presenta, a manera de referencia, la curva de eficiencia típica para motores de inducción tipo jaula de ardilla para diferentes capacidades, que sirve también para la metodología de evaluación de la eficiencia real del motor.

**GRÁFICO 6.6** Curva típica de eficiencia frente a carga para motores de inducción de jaula de 1800 RPM



Como parte de la auditoría de eficiencia energética se recomienda evaluar de manera separada la eficiencia del motor con respecto a la bomba normalmente acoplada al mismo, con el fin de conocer detalladamente donde se está desperdimando la energía. Evaluar por separado la eficiencia de cada componente es útil para tomar mejores decisiones en cuanto a las acciones a implementar dentro de un plan de ahorro energético.

La metodología para realizar esta evaluación está enfocada en determinar la eficiencia ( $\eta_m$ ) y, por ende, el nivel de pérdidas energéticas de los motores eléctricos en estudio.

El método de ingeniería más práctico y confiable para una estimación apropiada para la toma de decisiones es el método de la curva del motor. Este es un procedimiento iterativo basado en la comparación de la eficiencia calculada contra la reportada por las curvas características de eficiencia en función del factor de carga para el motor en estudio.

La metodología se explica a continuación de manera detallada:

**Paso 1.** A partir de las características nominales del motor (HP, RPM y V), se identifica la curva de eficiencia del motor de acuerdo con el gráfico 6.6.

**Paso 2.** A partir de la potencia eléctrica demandada por el motor (medición efectuada), se calcula el factor de carga nominal mediante la siguiente ecuación:

$$FC = \frac{P_e / \eta_m}{HP_{nom.} * 0,746}$$

Donde:

FC = factor de carga de operación del motor (-).

$P_e$  = potencia eléctrica demandada por el motor (dato obtenido en mediciones de campo) (kW).

$\eta_m$  = eficiencia de operación del motor (-).

$HP_{nom.}$  = potencia nominal del motor (la real verificada en campo) (HP).

**Paso 3.** Se comprueba en la curva del motor que la eficiencia utilizada en el paso 1 corresponda al factor de carga calculado; en caso contrario, habrá que repetir 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 y factor de carga son los reales del motor en estudio.

**Paso 4.** Una vez determinada la eficiencia y el factor de carga nominal, la eficiencia se deprecia de acuerdo con los siguientes criterios:

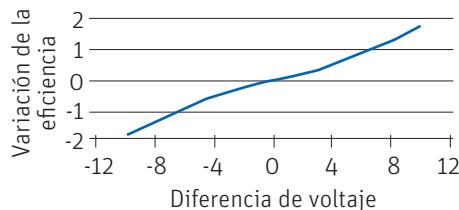
- Si el motor tiene más de 10 años de antigüedad, deberá depreciarse un punto.
- Si el motor ha sido rebobinado, habrá que depreciar dos puntos (véase la fórmula detallada en el apéndice), o si se conoce la temperatura a la que se expuso el motor durante el proceso de rebobinado, deberá depreciarse de acuerdo con el cuadro 6.4.

#### **CUADRO 6.4** Depreciación de la eficiencia de un motor rebobinado en función de la temperatura utilizada

Temperatura (°C)	Puntos de reducción de la eficiencia
633	0,0053
683	0,0117
733 (soplete)	0,0250
Químico	0,0040

- Si el voltaje de alimentación es diferente al de placa, habrá que aplicar el ajuste a la eficiencia indicado en la curva que se presenta en el gráfico 6.7.

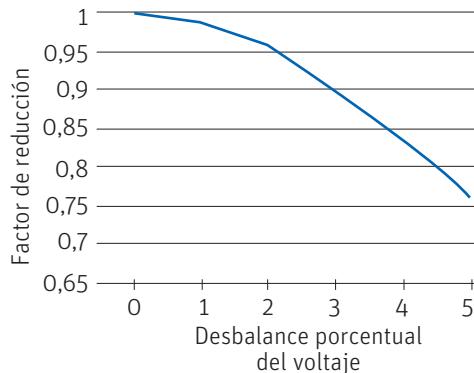
**GRÁFICO 6.7** Puntos de eficiencia a depreciar en función de la diferencia de voltaje con respecto a la nominal en un motor eléctrico



- Si el voltaje de alimentación medido presenta un desbalance, habrá que aplicar el ajuste a la eficiencia indicado en la curva que se presenta en el gráfico 6.8.

Los cálculos de desbalance de voltaje, corriente y diferencia respecto de la nominal se detallan a continuación.

**GRÁFICO 6.8** Reducción porcentual de la eficiencia de un motor eléctrico en función del desbalance de voltaje



### Desbalance de voltaje ( $D_{BV}$ )

El desbalance de voltaje se calcula a partir de las mediciones de tensión entre fases, por medio de la siguiente ecuación:

$$D_{BV} = \max((\max(V_{A-B}, V_{B-C}, V_{C-A}) - V_{\text{prom}}), (V_{\text{prom}} - \min(V_{A-B}, V_{B-C}, V_{C-A})))$$

Donde:

- $D_{BV}$  = desbalance de voltaje (-).
- $V_{A-B}$  = tensión entre las fases A y B (V).
- $V_{B-C}$  = tensión entre las fases B y C (V).
- $V_{C-A}$  = tensión entre las fases C y A (V).
- $V_{\text{prom}}$  = tensión promedio entre fases (V).

### **Desbalance de corriente ( $D_{BI}$ )**

El desbalance de corriente se calcula a partir de las mediciones de corriente por fase, por medio de la siguiente ecuación:

$$D_{BI} = \max((\max(I_A, I_B, I_C) - I_{prom}), (I_{prom} - \min(I_A, I_B, I_C)))$$

Donde:

- $D_{BI}$  = desbalance de corriente (-).  
 $I_A$  = corriente de la fase A (A).  
 $I_B$  = corriente de la fase B (A).  
 $I_C$  = corriente de la fase C (A).  
 $I_{prom}$  = corriente promedio de las tres fases (A).

### **Voltaje de alimentación diferente del nominal (VDN)**

El valor de la tensión de alimentación diferente de la nominal se calcula en términos porcentuales de acuerdo con la siguiente expresión:

$$VDN = (V_{prom} - V_{placa}) / V_{placa} * 100$$

Donde:

- $VDN$  = diferencia porcentual entre el valor del voltaje de alimentación y el dato de placa del voltaje nominal (-).  
 $V_{prom}$  = voltaje promedio entre fases (V).  
 $V_{placa}$  = valor de voltaje nominal de alimentación, indicado en la placa (V).

## **CÁLCULO DE PÉRDIDAS Y EFICIENCIA DE LA BOMBA**

Como ya se comentó, uno de los mayores puntos de pérdidas energéticas se presenta en la etapa de transformación de la energía eléctrica en energía mecánica obtenida por medio del sistema de bombeo y transmitida al fluido en forma de potencia manométrica.

Por ende, es importante diagnosticar varios aspectos que pueden ser la causa de un excesivo consumo energético y, al mismo tiempo, presentar oportunidades para ahorrar energía de manera sustancial y con bajo costo.

Los principales aspectos a diagnosticar en estos sistemas son:

- A. La eficiencia electromecánica actual.
- B. Las condiciones de operación del sistema.
- C. Las características de las instalaciones y pérdidas energéticas en el sistema de conducción.

### **Pérdidas y cálculo de eficiencia en la bomba**

Durante su operación, las bombas sufren pérdidas naturales como resultado de los mecanismos hidráulicos que suceden en el interior y exterior de sus componentes, por lo cual es lógico que no se pueda mantener la eficiencia de la bomba nueva.

Para entender de dónde vienen 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 según se detalla a continuación.

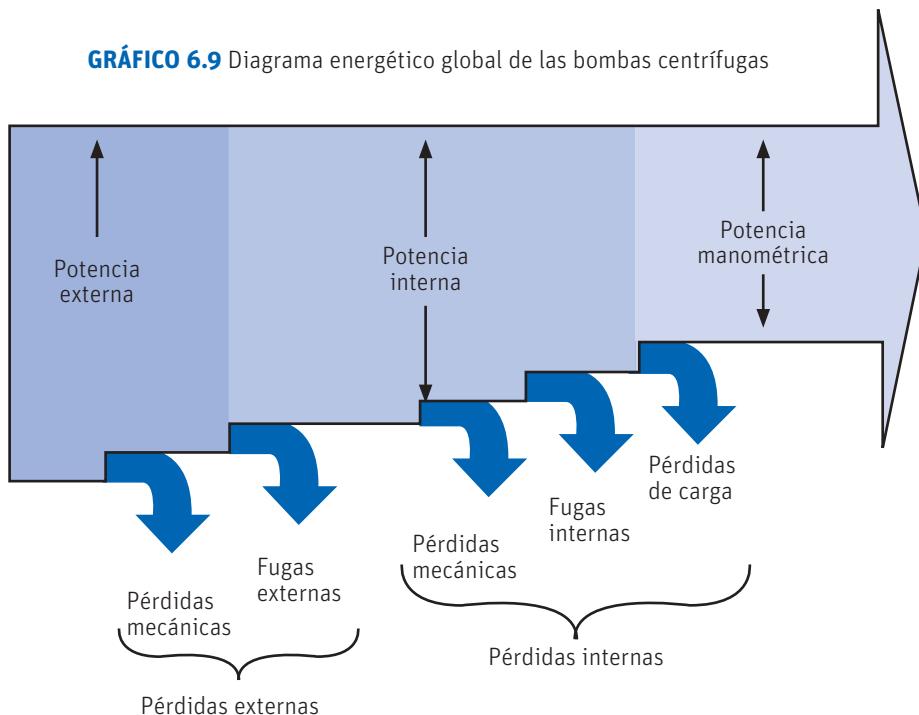
### Pérdidas internas

- Pérdidas de carga: resultan de la viscosidad y la turbulencia del fluido. Un ejemplo de pérdidas de carga lo constituyen 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. Esto da lugar a frotamiento viscoso, lo cual produce pérdidas internas por rozamiento en el fluido.

### Pérdidas externas

- Fugas externas: estas se producen en los lugares donde el eje atraviesa a la carcasa de la máquina. Una parte del caudal que entra a la bomba se deriva antes de ingresar en el 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.

En el gráfico 6.9 se presentan los flujos de pérdidas y diversos rendimientos de la bomba centrífuga en forma de diagrama de Sankey.



La eficiencia global a la que la bomba opera se calcula entonces como el cociente entre la potencia manométrica de salida  $P_s$  y la potencia mecánica absorbida  $P_m$ , que se identifica en el diagrama como potencia externa. La fórmula de la eficiencia es:

$$\eta_b = \frac{\text{Potencia de salida (}P_s\text{)}}{\text{Potencia absorbida (}P_m\text{)}} \times 100$$

Donde:

$\eta_b$  = eficiencia de la bomba (-).

$P_s$  =  $Q \rho g H_t / 746$  (HP).

$P_m$  = potencia mecánica absorbida por la bomba (HP).

$Q$  = flujo volumétrico ( $m^3/s$ ).

$\rho$  = densidad del agua bombeada ( $kg/m^3$ ).

$g$  = aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

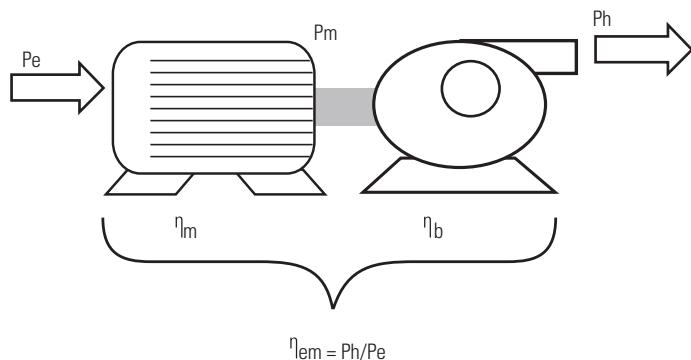
$H_t$  = carga total de bombeo (mca).

En base 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 detalla a continuación.

### Evaluación de la eficiencia electromecánica ( $\eta_{em}$ )

La eficiencia electromecánica corresponde a la eficiencia del conjunto motor-bomba, que gráficamente se puede representar de la manera en que se aprecia en el gráfico 6.10.

**GRÁFICO 6.10** Diagrama esquemático de las eficiencias que integran la eficiencia electromecánica



Dicha eficiencia se determina de la siguiente manera:

**Paso 1.** Se calcula en primer lugar la potencia manométrica a través de esta fórmula:

$$P_h = H_t * Q * \gamma * g / 1000$$

Donde:

- $P_h$  = potencia manométrica (kW).
- $H_t$  = carga total de bombeo (mca).
- $Q$  = gasto ( $m^3/s$ ).
- $\gamma$  = peso específico del agua ( $kg/m^3$ ).
- $g$  = aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

El valor de  $Q$  es un dato obtenido de las mediciones de campo, los valores  $\gamma$  y  $g$  son datos casi constantes en el rango típico de temperaturas de operación y generalmente se toman los valores de 1 y 9,81 respectivamente.

La carga total de bombeo es una combinación de las distintas cargas parciales que se calculan como se detalla a continuación.

### **Cálculo de la carga total de bombeo ( $H_t$ )**

De acuerdo con el tipo de mediciones efectuadas, la carga total de bombeo se calculará de la siguiente manera:

- Si se midió la presión de succión, como se recomienda hacer en los sistemas de bombeo:

$$H_t = (P_d - P_s) * 10.3$$

Donde:

- $H_t$  = carga total de bombeo (mca).
- $P_d$  = presión de descarga medida ( $kg/cm^2$ ).
- $P_s$  = presión de succión medida ( $kg/cm^2$ ).

- Si no se midió la presión de succión (que es el caso de los pozos profundos o sistemas de bombeo, donde no se puede medir la presión de succión):

$$H_t = (P_d * 10.3) + N_s + D_{r-m} + h_v + h_{fs}$$

Donde:

- $H_t$  = carga total de bombeo (mca).
- $P_d$  = presión de descarga medida ( $kg/cm^2$ ).
- $N_s$  = nivel de succión (m).
- $D_{r-m}$  = nivel de referencia a centros del manómetro (m).
- $h_v$  = carga de velocidad (mca).
- $h_{fs}$  = pérdidas por fricción en la tubería de succión (mca).

### Carga de velocidad ( $h_v$ )

La carga de velocidad está en función del diámetro de la tubería para lo cual es necesario calcular el área de la sección transversal de la tubería de descarga (A) de la siguiente forma:

$$A = \frac{\pi * (\Phi)^2}{4}$$

Donde:

- A = área de la sección transversal de la tubería ( $m^2$ ).
- $\Phi$  = diámetro de la tubería (m).
- $\pi$  = valor que se toma igual a 3,1416.

En base a este cálculo puede establecerse también la velocidad del fluido (v) con la siguiente fórmula:

$$v = Q / A$$

Donde:

- v = velocidad del fluido (m/s).
- Q = caudal medido en campo ( $m^3/s$ ).
- A = área de la sección transversal de la tubería ( $m^2$ ).

Con estos valores finalmente se puede calcular la carga por velocidad con esta fórmula:

$$h_v = v^2 / (2 * g)$$

Donde:

- $h_v$  = carga de velocidad (mca).
- v = velocidad del fluido (m/s).
- g = aceleración de la gravedad ( $m^2/s$ ).

**Paso 2.** Con el valor de  $P_h$  calculado y la potencia eléctrica medida, se determina la eficiencia electromecánica final con la siguiente fórmula:

$$\eta_{EM} = P_h / P_e$$

Donde:

- $\eta_{EM}$  = eficiencia electromecánica (-).
- $P_h$  = potencia manométrica (kW).
- $P_e$  = potencia eléctrica medida (kW).

**Paso 3.** Una vez calculada la eficiencia electromecánica, la eficiencia de la bomba  $\eta_B$  por separado, se determina eficiencia de bombas ( $\eta_b$ ) de la siguiente manera:

$$\eta_B = \eta_{EM} / \eta_M$$

Donde:

- $\eta_M$  = eficiencia del motor (-).

Este valor se calcula para todos los equipos a diagnosticar y es el que se utilizará como base para el desarrollo del plan de eficiencia energética.

## CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS

Las tuberías de succión y descarga también generan pérdidas energéticas debidas a la fricción del fluido sobre las paredes de las mismas. Para el cálculo de estas pérdidas se recomienda el siguiente procedimiento.

En primer lugar, se calcula el coeficiente de fricción, que se determina por medio de la ecuación de Colebrook-White, a partir de los valores del número de Reynolds y rugosidad relativa, definido como el cociente de rugosidad absoluta ( $\epsilon$ ) y el diámetro (D) en mm.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\epsilon/D + 2.51}{3.71} \frac{Re\sqrt{f}}{Re^{0.9}} \right]$$

La fórmula anterior es de tipo implícita por lo que debe iterarse. Alternativamente, se puede utilizar la siguiente fórmula que es explícita (sin necesidad de iterar) y utiliza los mismos parámetros.

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{\epsilon/D + 5.74}{3.7} \right) \right]^2}$$

Fuente: Guerrero, O. (1995). Ecuación modificada de Colebrook-White. Revista Ingeniería hidráulica de México, Vol. X, pp. 43-48, enero-abril.

La rugosidad absoluta ( $\epsilon$ ) es una característica del material de tubería. Los valores para los diferentes materiales se ven en el gráfico 6.11.

El número de Reynolds se define como:

$$Re = v * D * \rho / \mu$$

Donde:

- v = velocidad del fluido (m/s).
- D = diámetro interior de la tubería (m).
- $\mu$  = viscosidad dinámica del fluido (mPa·s), la que se determina de tablas como función de la temperatura.
- $\rho$  = densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>).

**CUADRO 6.5** Viscosidad dinámica del agua

Temperatura (°C)	Viscosidad (mPa·s)
10	1,308
20	1,002
30	0,7978
40	0,6531
50	0,5471
60	0,4668

Las pérdidas por fricción en una tubería se calculan mediante la siguiente fórmula:

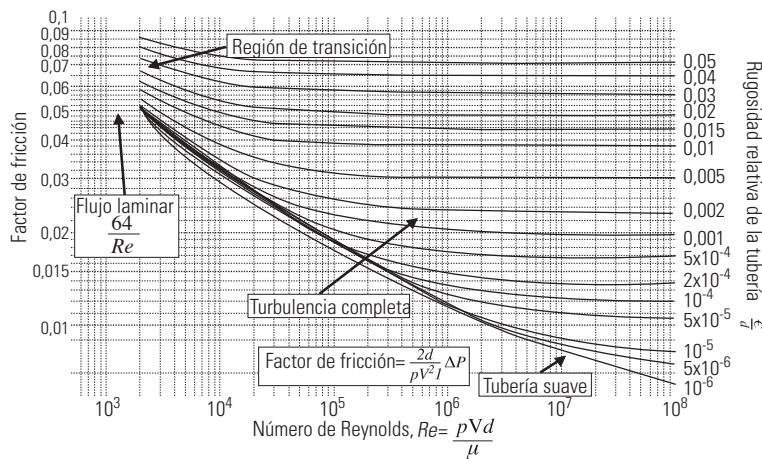
$$h_f = f * (L/D) * (v^2/2*g)$$

Donde:

- $h_f$  = pérdida de carga por fricción (m).
- $f$  = coeficiente de fricción.
- $L$  = longitud de la tubería (m).
- $D$  = diámetro de la tubería (m).
- $v$  = velocidad del fluido (m/s).
- $g$  = aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

El factor de fricción o coeficiente de fricción se obtiene del diagrama, iterando la fórmula de Colebrook utilizando el diagrama de Moody (véase el gráfico 6.11), en el cual se consigue representar la expresión de Colebrook en un ábaco de fácil manejo, que integra el valor de  $f$  para todos los tipos de flujos. En este diagrama se entra con el valor de la rugosidad relativa calculada en este recuadro y el valor del número de Reynolds, y para cada una de las tuberías de succión y descarga. El valor obtenido en el diagrama deberá ser ingresado en el cuadro correspondiente.

**GRÁFICO 6.11** Diagrama de Moody



Material	$\epsilon$ (mm)
Hormigón, grueso	0,25
Hormigón, liso	0,025
Tubería estirada	0,0025
Vidrio, plástico	0,0025
Hierro fundido	0,015
Alcantarillados viejos	3,0
Acero forrado de mortero	0,1
Acero oxidado	0,5
Acero forjado	0,025
Cañería principal vieja	1,0

## CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS EN LA RED

Otro aspecto básico a evaluar durante la auditoría de eficiencia energética –y donde generalmente se encuentran áreas de oportunidad para corregir situaciones de excesivo consumo energético, siendo una fuente de medida de ahorro de bajo costo– está constituido por las características de la instalación y, particularmente, por las características de la red de conducción asociada a cada sistema de bombeo.

Entre los puntos clave se encuentran la configuración física de los trenes de descarga de pozos profundos y de los sistemas de conducción a la descarga de las baterías de bombeo o en captaciones superficiales como tomas de río, manantiales, presas o galerías filtrantes.

Los principales puntos a observar son los siguientes:

**A. Condiciones de succión.** En muchas ocasiones, la eficiencia de los sistemas se abate por la falta de condiciones apropiadas de carga en la succión. Técnicamente, este concepto se conoce como altura neta positiva de succión. Durante la auditoría de eficiencia energética es importante verificar que se cumplan las condiciones mínimas para que no se presente este problema. Si bien no es el más recurrente, se observa en diseños inadecuados, y ocasiona problemas en las bombas.

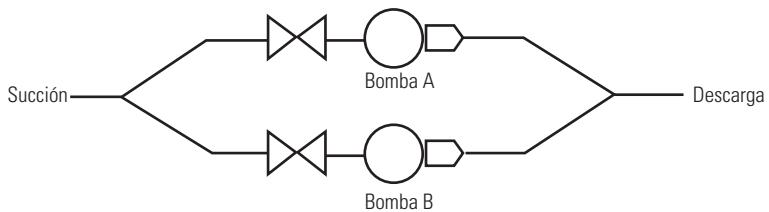
**B. Características de los sistemas de conducción.** Es muy común encontrar escasa capacidad de los sistemas de conducción a la descarga de los sistemas de bombeo. Esto se refleja en tres problemas típicos que deberán identificarse durante la auditoría de eficiencia energética para emitir las recomendaciones pertinentes:

**B.1** Problemas de contrapresión que se oponen al flujo desde una fuente o equipo de bombeo. Esto sucede cuando se juntan caudales de fuentes que normalmente descargan a diferentes presiones.

**B.2** Reducción en la capacidad de producción de trenes de bombeo. Este problema se presenta frecuentemente en sistemas de bombeo compuestos por equipos múltiples que trabajan en paralelo, donde se ha aumentado el número de equipos con la pretensión de entregar más caudal a la red, sin revisar la capacidad de la conducción, lo que ocasiona que trabajando en conjunto los equipos no suministren el caudal para el que son capaces de manera individual y se reduzca significativamente su eficiencia. Este problema se explica técnicamente por la teoría de los sistemas que operan en paralelo, que se desarrolla brevemente a continuación.

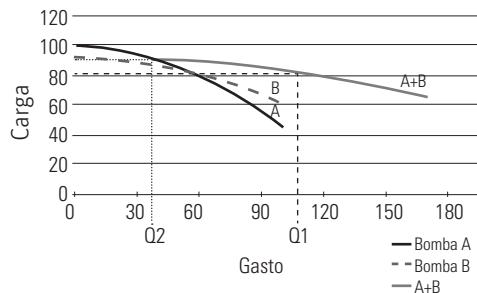
Obsérvese el esquema de uso de dos bombas dispuestas como se muestra en el gráfico 6.12.

**GRÁFICO 6.12** Arreglo típico de bombas centrífugas operadas en paralelo



Normalmente, la curva de operación del arreglo se lleva a cabo sumando las capacidades de cada bomba para iguales condiciones de carga. El resultado se puede apreciar en el gráfico 6.13.

**GRÁFICO 6.13** Características de carga-capacidad de bombas centrífugas operadas en paralelo



Donde teóricamente:

$$Q_{AB} = Q_A + Q_B.$$

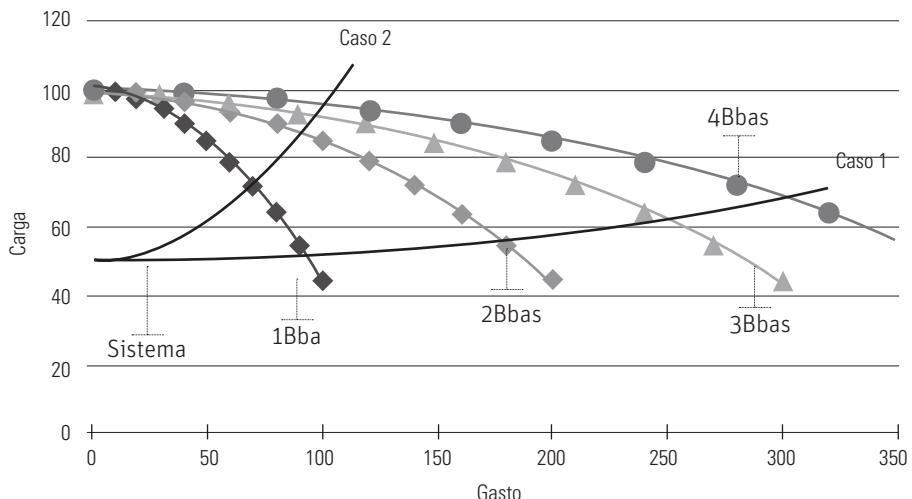
Con frecuencia se piensa que al colocar una bomba adicional se incrementará el gasto al doble y, si se agrega una tercera, al triple, y así sucesivamente.

En la realidad esto no ocurre así, ya que al haber más gasto por el mismo sistema de conducción la carga se incrementa y esto hace que la aportación de cada bomba individualmente se reduzca, tal y como se observa en el gráfico 6.14, donde se presenta el comportamiento conjunto para dos casos.

En el caso 1, la curva del sistema es bastante plana para las cuatro bombas, por lo que conforme se agregan 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. Nótese que al entrar la cuarta bomba, prácticamente ya no se incrementa el flujo total, sino que este se reparte entre las cuatro bombas.

**GRÁFICO 6.14** Efecto de varias bombas en paralelo sobre el sistema de conducción



**B.3** Pérdidas excesivas de energía por escasa capacidad de los sistemas de conducción existentes. Es posible que en algunos sistemas de distribución, las perdidas energéticas por cortante (fricción) en las tuberías sean significativas. Para evaluar esta posibilidad, durante la auditoría de eficiencia energética se recomienda seguir el siguiente procedimiento:

- Con los datos recopilados durante la campaña de medición e inspección de campo, evaluar la velocidad del fluido en las tuberías primarias de conducción a la descarga de pozos y sistemas de bombeo.
- En tuberías de conducción donde se tengan velocidades del fluido por encima de los 2,0 m/s, que es el criterio establecido en la práctica, evaluar las pérdidas energéticas por este concepto, para integrarlas posteriormente en una medida de la cartera de proyectos de eficiencia energética a considerar.

Para realizar esta evaluación de pérdidas en conducción, existen las siguientes opciones:

- 1) Realizar la evaluación con los métodos de análisis de conducciones basados en la modelación hidráulica, lo cual implica la necesidad de construir dicha herramienta antes de esta evaluación.
- 2) Aplicar el procedimiento convencional para una evaluación rápida del potencial de ahorro.

Esta última opción es recomendable en las primeras etapas del plan al determinar las “medidas de ahorro de rápida implementación” sin necesidad de esperar a contar con el modelo de simulación.

Para realizar el análisis por el método convencional, se sigue el siguiente procedimiento:

**Paso 1.** Calcular las pérdidas primarias (tubería recta) por fricción en la tubería actual, mediante la siguiente metodología:

i) Cálculo del coeficiente de fricción.

El coeficiente de fricción se determina por medio del diagrama de Moody, a partir de los valores del número de Reynolds y rugosidad relativa.

El número de Reynolds se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Reynolds} = v * D / \eta$$

Donde:

v = velocidad del fluido (m/s).

D = diámetro de la tubería (m).

$\eta$  = viscosidad cinemática del fluido ( $m^2/s$ ), la que se determina de tablas como función de la temperatura.

El valor de la rugosidad relativa ( $\epsilon$ ) se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$\epsilon = \frac{\varepsilon}{D}$$

Donde:

$\varepsilon$  = rugosidad absoluta (mm).

D = diámetro (mm).

La rugosidad absoluta es una característica del material. Los valores de  $\varepsilon$  para diferentes tuberías se muestran a continuación.

#### Valores de $\varepsilon$ para diferentes tuberías $\varepsilon$ (mm)

Acero remachado	0,9 - 9
Concreto	0,3 - 3
Hierro fundido	0,25
Hierro galvanizado	0,15
Hierro fundido asfaltado	0,12
Acero comercial o hierro forjado	0,025 - 0,046
Tubería estirada	0,0015 - 0,0025

ii) Cálculo de las pérdidas de carga por fricción (mca).

$$h_f = f * (L/D) * (v^2/2*g)$$

Donde:

f = coeficiente de fricción (diagrama de Moody o fórmula de Colebrook) (-).

L = longitud de la tubería (m).

D = diámetro de la tubería (m).

v = velocidad del fluido (m/s).

g = aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

**Paso 2.** Calcular las pérdidas secundarias (accesorios).

La determinación de las pérdidas secundarias puede llevarse a cabo por varios métodos. Durante el presente trabajo solo se mencionará el método de longitud de tubería recta equivalente.

Este método consiste en evaluar la caída de presión que se genera a través de un accesorio de tubería y determinar una longitud de tubería recta que dé como resultado la misma cantidad de pérdida.

En el gráfico 6.15 se muestra un nomograma con diversos accesorios de tubería, el cual consta de tres escalas.

Si se une con una recta el punto de la escala izquierda correspondiente al accesorio en cuestión con el punto de la escala derecha correspondiente al diámetro interior de la tubería, el punto de intersección de esta recta con la escala central indica la cantidad de tubería recta equivalente del accesorio.

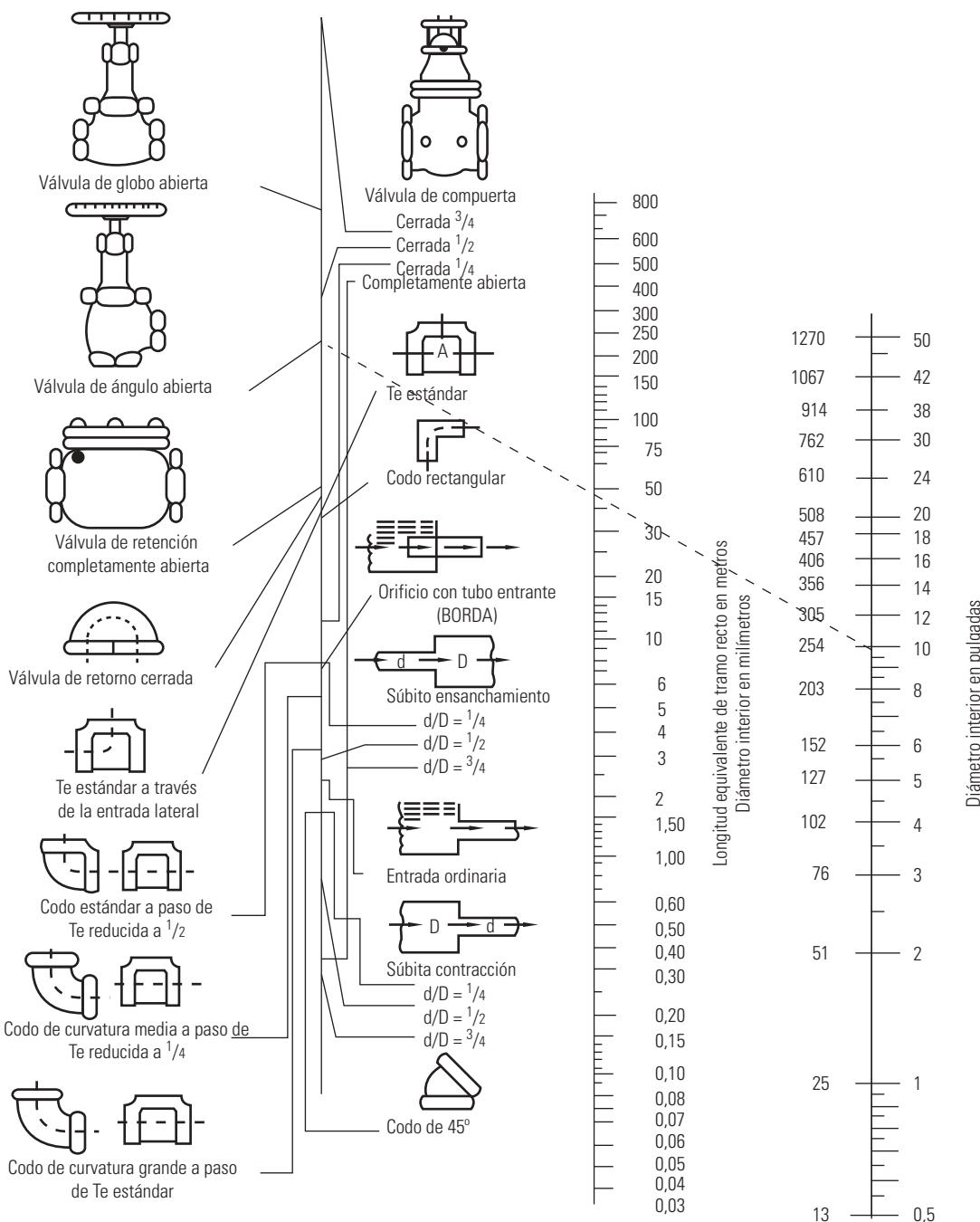
Una vez que se ha obtenido la longitud equivalente de los accesorios, se procede a determinar la caída de presión o pérdidas secundarias por medio de la siguiente expresión:

$$h_f = f \frac{\Sigma L}{D} - \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

$\Sigma L$  = suma de todas las longitudes equivalentes cuyo diámetro es igual.

**GRÁFICO 6.15** Nomograma para cálculo de longitud equivalente en accesorios de tuberías



**Paso 3.** Una vez calculadas las pérdidas totales por fricción, se procederá a calcular la potencia eléctrica necesaria para compensar las pérdidas de carga por fricción.

Este es el punto final de la evaluación de pérdidas durante la auditoría de eficiencia energética y se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_e = \frac{(hfr * Q * 9.81)}{\eta_{em}}$$

Donde:

$P_e$  = potencia eléctrica necesaria para compensar pérdidas (kW).

$hfr$  = pérdidas de carga por fricción (mca).

$Q$  = caudal manejado (l/s).

$\eta_{em}$  = eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba (-).

Es común encontrar que, cuando no se cuenta con la capacidad de conducción suficiente, la potencia eléctrica necesaria para compensar este problema equivale a un porcentaje significativo de la potencia que está demandando el equipo de bombeo asociado a la misma, lo cual es una base fundamental para el cálculo de esta medida de ahorro dentro del plan de eficiencia energética.

## CÁLCULO DE INDICADORES ENERGÉTICOS

Los indicadores son medidas de la eficiencia y eficacia del sistema de agua potable. Aunque existe una gran cantidad de indicadores, en el escenario de la eficiencia energética que se considera aquí se propone el seguimiento mínimo de los siguientes:

- Indicador energético (IE) (kWh/m<sup>3</sup>).
- Indicador de costo unitario de energía (CUE) (\$/kWh).

Es importante determinar estos indicadores permanentemente en las empresas de agua y saneamiento, y especialmente cuando se estén realizando acciones de incremento de la eficiencia, puesto que a través de ellos se puede 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.

### Indicador energético (IE) (kWh/m<sup>3</sup>)

#### 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. El volumen de agua producido se expresa en metros cúbicos al año. La energía utilizada se determina utilizando los datos del historial de consumo 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 IE 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.

$$IE = \frac{\text{Energía total consumida por equipos (kWh/año)}}{\text{Volumen total de agua producida en captaciones (m}^3\text{/año})}$$

### **Meta**

No existe un valor del indicador base de referencia, puesto que depende en gran medida del tipo de captaciones de agua de que se disponga en el sistema de abastecimiento y de la topografía de la ciudad. Los sistemas con suministro de agua solo por bombeo y las topografías muy accidentadas tenderán a elevar el índice; de igual forma, los sistemas con muchas fugas en la red harán que se incremente el volumen de agua suministrada, y aumentarán la energía utilizada para producir esa cantidad de agua adicional.

Para una empresa de agua, este indicador irá a la baja cuando se reduzcan los consumos de energía con equipos de bombeo eficientes y en la medida en que disminuyan las fugas en la red.

### **Indicador de costo unitario de energía (CUE) (\$/kWh)**

#### **Cálculo**

Representa el costo específico por unidad de energía consumida, el cual depende de varios factores, entre ellos: 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, tales como la penalización o bonificación por el factor de potencia de la instalación.

Este indicador se calcula en base a la estadística de consumo y facturación energética anual recopilada por la empresa de agua y saneamiento, así como también la producción anual de agua potable.

$$CUE = \frac{\text{Importe de facturación eléctrica } (\$/\text{año})}{\text{Energía total consumida } (\text{kWh}/\text{año})}$$

### **Meta**

Al igual que en el caso del indicador anterior, no existe un valor medio de referencia.

La meta del índice debe ser fijada por cada empresa de agua en función de su infraestructura electromecánica y los costos respectivos.

### **ELABORACIÓN DE BALANCES DE ENERGÍA**

Una vez establecidas las eficiencias energéticas de los componentes del sistema de bombeo, se debe determinar el balance de energía actual del equipo en estudio.

La finalidad del balance de energía es identificar los elementos del sistema de bombeo en los cuales se registran los mayores consumos energéticos, **y sirve de base para la planificación de las medidas de ahorro correspondientes.**

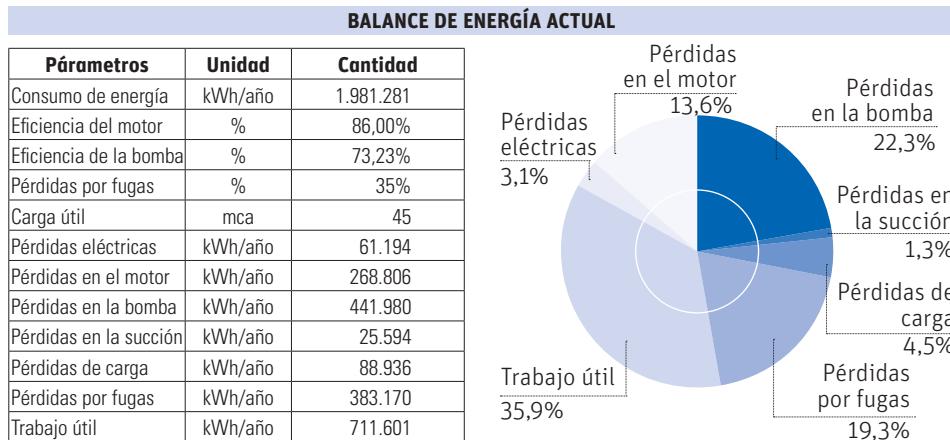
El valor más significativo que se obtiene de este balance es el desglose de todas las pérdidas energéticas a lo largo de la cadena de suministro y utilización de la energía, y su diferenciación del trabajo útil, que indica la cantidad de energía que realmente es utilizada por el sistema para los fines de bombeo de agua. Todo lo que no sea trabajo útil se convierte en pérdidas, y el balance permite distinguir cómo

están distribuidas y cuáles son las más impactantes, lo cual a su vez indicará dónde está el 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 con lo indicado en las subsecciones anteriores. Estos resultados se disagregan de acuerdo con los conceptos descritos en el cuadro 6.6, y se obtienen los valores de los consumos de energía en cada elemento del sistema.

**CUADRO 6.6** Ejemplo de disagregación de pérdidas en un sistema de bombeo del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) en Costa Rica

**GRÁFICO 6.16** Disagregación de pérdidas de un sistema de bombeo del AyA en Costa Rica



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.

**Eficiencia de la bomba.** Es la eficiencia real de la bomba.

**Pérdidas por fugas.** Se trata de la estimación de pérdidas por fugas en la red de distribución de acuerdo con estudios previos, y debe ser un valor ingresado.

**Carga útil.** Es la carga que debe tener la bomba debido al desnivel físico por cuestiones topográficas del sistema, más la distancia que existe entre la succión y el cabezal de la bomba, y se expresa en metros de columna de agua.

**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.

**Pérdidas en el motor.** Son las pérdidas de energía que se producen en el motor, por la eficiencia real de trabajo del mismo.

**Pérdidas en la bomba.** Son las pérdidas de energía que tienen lugar en la bomba, por 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.

**Pérdidas de carga.** Son las pérdidas totales de carga de la bomba calculadas en relación de la carga neta de la misma y la carga útil 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 calculadas las pérdidas de cada uno de los elementos que componen al sistema de bombeo se puede hacer un gráfico en forma de torta, como el gráfico 6.16, para una mejor percepción del balance energético.

## ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

En este punto hay dos aspectos a observar:

- Las condiciones de carga y caudal reales en que operan los sistemas de bombeo para determinar si son constantes o cambian por períodos.
- La forma de operación con respecto al manejo de niveles de cárcamos en caso de los bombeos y tanques de regulación.

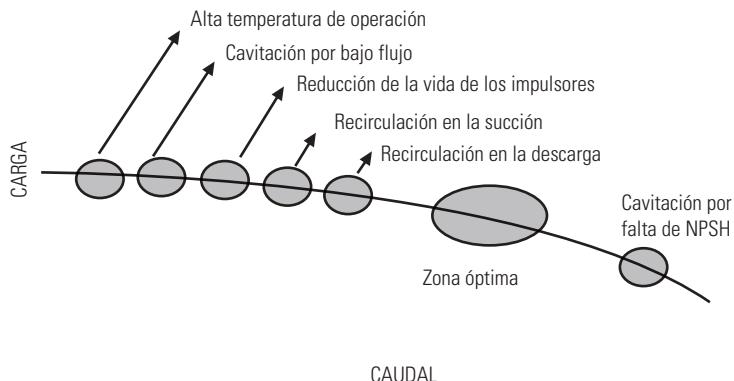
Para el primer aspecto, hay que considerar las cuestiones que se plantean a continuación.

De acuerdo con su diseño, todos los equipos tienen un punto de operación carga-caudal óptimo, donde todas las pérdidas descritas anteriormente se minimizan. Fuera de este punto se presentan problemas como los siguientes:

- Bajo rendimiento energético.
- Reducción del tiempo de vida de los componentes, particularmente de los impulsores y anillos de desgaste.
- Cavitación por bajo flujo en la succión.
- Capital ocioso sin ocupar (en el caso de poca utilización).
- Mayor presión por el deterioro del medio ambiente (en caso de poca utilización).

En el gráfico 6.17 se presenta un esquema de los problemas típicos que se ocasionan por operar fuera de la zona óptima de operación.

**GRÁFICO 6.17** Diagrama esquemático de los problemas que se presentan por operación de las bombas fuera de su punto óptimo

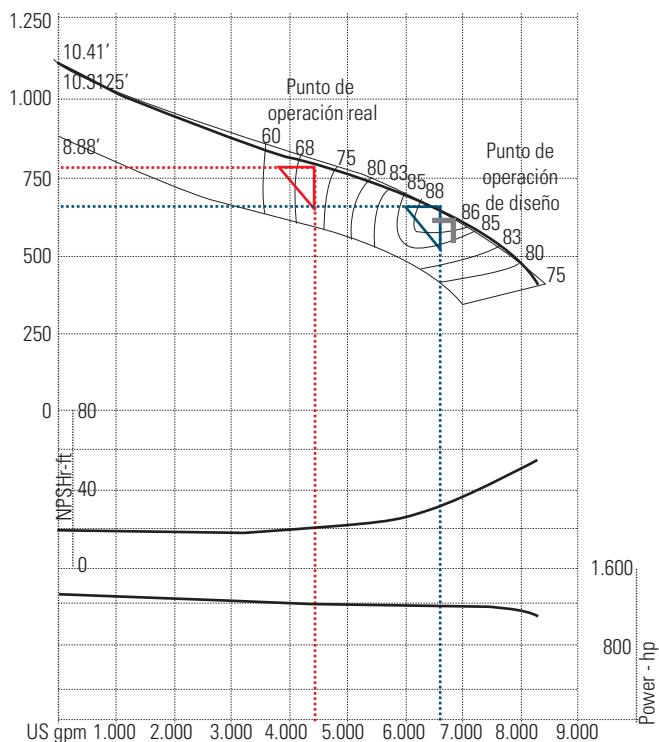


Es muy común encontrar que los sistemas de bombeo operan en condiciones diferentes para las que están diseñados. Entre las causas que originan este problema pueden mencionarse las siguientes:

- Tandeos excesivos. Es común encontrar que los equipos operen hacia distintos puntos de la red, incluso en el mismo día. Es típica la operación de tandeo donde un día el sistema suministra directo a la red y otro día suministra hacia un tanque para abastecer a otra zona poblacional.
- Reparaciones urgentes. Debido a la falta de mantenimiento preventivo, es común que se atiendan reparaciones urgentes y se carezca de componentes en inventario disponibles para realizar las reparaciones pertinentes o la sustitución de equipos apropiados a cada aplicación, por lo que generalmente se recurre a la instalación de equipos disponibles que en la mayoría de los casos están diseñados para otras condiciones de operación.

El efecto en la reducción de la eficiencia del sistema de bombeo se ilustra en el gráfico 6.18, donde se puede observar que una variación significativa en las condiciones de operación carga-caudal puede implicar variaciones de hasta un 20% en la eficiencia del equipo.

**GRÁFICO 6.18** Modificación de la eficiencia por variación de condiciones de operación en una bomba



En el segundo aspecto, la situación a verificar consiste en determinar la operación típica en cuanto a control de niveles en la succión y descarga de los equipos de bombeo. Es muy común que esta operación se lleve a cabo manualmente, lo cual ocasiona ineficiencias como derrame en tanques, lo que lleva a operar los equipos de bombeo más tiempo de lo debido o hacerlo durante lapsos prolongados en condiciones desfavorables de carga y, por ende, de eficiencia electromecánica.

Ante esta situación, es muy importante que durante la auditoría de eficiencia energética se realicen las siguientes tareas:

- Identificar claramente el esquema de operación del equipo en estudio. Esto incluye las condiciones de operación de carga-caudal para diferentes períodos del día o semanalmente, y la duración de los mismos.
- Conseguir los parámetros de diseño o, de ser posible, la curva original de diseño del equipo que se encuentre instalado en ese momento para poder dar las recomendaciones pertinentes a cada situación.

## Capítulo 7

### IDENTIFICACIÓN DE OPORTUNIDADES DE AHORRO DE ENERGÍA

Sobre la base del análisis de la información obtenida durante la auditoría de eficiencia energética, incluidas las condiciones operativas y de mantenimiento encontradas, se desarrolla una cartera de proyectos que abarque todas las oportunidades posibles de ahorro tanto energético como económico, incluidas las medidas sin o con baja inversión y las que sí requieran inversión; para estas últimas, es necesario realizar el análisis costo-beneficio, que puede ser un análisis de retorno simple de la inversión o un análisis más profundo basado en el valor presente neto que considere el tiempo de vida del bien adquirido, lo cual se verá en el capítulo 8 del presente manual.

En general, las acciones determinadas en cada proyecto están orientadas a controlar y optimizar las variables que afectan el consumo y el costo energético.

Para los fines de este manual, las medidas de ahorro se clasifican en los siguientes grupos:

- 1) Medidas relacionadas con la tarifa de energía.
- 2) Medidas para la reducción de pérdidas en las instalaciones eléctricas.
- 3) Medidas para incrementar la eficiencia de los motores.
- 4) Medidas para incrementar la eficiencia de las bombas.
- 5) Reducción de pérdidas de carga.
- 6) Reducción de fugas.
- 7) Mejorar la operación.
- 8) Mejorar el mantenimiento.
- 9) Reemplazo de la fuente de suministro de energía eléctrica.

La descripción detallada y sus respectivas bases teóricas así como también los criterios usados para la aplicación de estas medidas se describen a continuación, siguiendo el orden presentado anteriormente.

#### MEDIDAS RELACIONADAS CON LA TARIFA DE ENERGÍA

##### **Cambio de tarifa por la que resulte más económica**

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. Para esto, una actividad fundamental de la auditoría energética es la de estudiar el pliego tarifario aplicable.

Las tarifas usualmente aplicables a empresas de agua y saneamiento pueden variar de acuerdo con los contratos que se establecen con la empresa que suministra la energía eléctrica.

El proyecto de optimización tarifaria se compone de dos etapas:

**Etapa 1.** Identificar las tarifas en que se encuentran todos y cada uno de los servicios de la empresa de agua, así como también las demandas y los consumos de cada instalación. Con esta información se inicia el análisis de las tarifas contratadas.

**Etapa 2.** Evaluar las posibilidades de ahorro en el costo de energía eléctrica con las diferentes tarifas aplicables. En esencia se trata de establecer una comparación de los importes que se pagarían en el caso de cada una de las tarifas en las que puede ser contratado el servicio.

En esta etapa es importante considerar todos los costos asociados en cada tarifa. Por ejemplo, si se va a cambiar una tarifa suministrada en baja tensión por una suministrada en media o alta tensión, en los costos habrá que considerar las inversiones necesarias para la adquisición e instalación de transformadores eléctricos, así como también los costos asociados al mantenimiento de dichos transformadores.

Para ilustrar la situación cabe observar el caso de un proveedor de agua en Centroamérica, donde se realizó un análisis comparativo de tarifas en algunas de las principales estaciones de bombeo. Las tarifas examinadas fueron las siguientes:

- Tarifa en baja tensión con demanda (BTD).
- Tarifa en baja tensión por bloque horario (BTH).
- Tarifa en media tensión con demanda (MTD).
- Tarifa media tensión por bloque horario (MTH).

El detalle de este análisis se presenta en el cuadro 7.1.

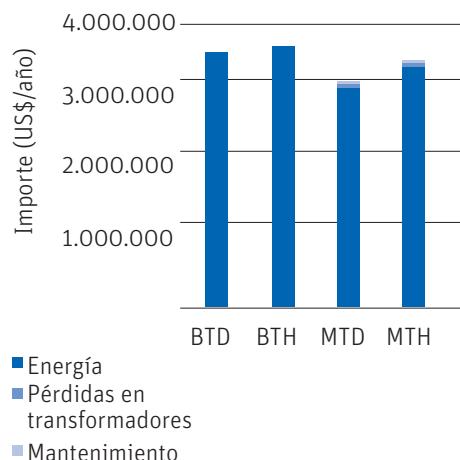
**CUADRO 7.1** Análisis comparativo de tarifas eléctricas

Planta	Facturación promedio		Recomendación				
	Tarifa	Consumo (kWh/año)	Tarifa	Ahorros (US\$/año)	Inversión (US\$)	Mtto (US\$/año)	Payback (años)
Betania	BTD	574.356	MTD	17.355,80	30.400,00	5.000,00	2,46
Cabima	BTD	923.520	MTD	27.786,29	30.400,00	5.000,00	1,33
Ciudad Bolívar	BTD	5.773.440	MTD	174.409,63	50.000,00	8.000,00	0,30
Don Bosco	BTD	1.158.400	MTD	34.624,47	32.000,00	7.000,00	1,16
Gonzalillo	BTD	413.920	MTD	12.496,23	11.500,00	4.500,00	1,44
Las Cumbres	BTD	1.176.320	MTD	35.509,72	30.400,00	5.000,00	1,00
La Paz Mirador	BTD	836.800	MTD	25.281,25	28.000,00	4.500,00	1,35
Cuivo Chivo	BTD	997.760	MTD	30.105,95	30.400,00	5.000,00	1,21
Mañanitas	BTD	713.280	MTD	21.508,21	28.000,00	5.000,00	1,70
Pacora (agua tratada)	BTD	2.078.076	MTD	62.247,73	34.000,00	6.500,00	0,61
Pacora (agua cruda)	BTD	2.421.120	MTD	73.167,89	34.000,00	7.500,00	0,52
Chorrera (agua cruda)	BTD	2.896.320	MTD	87.725,87	34.000,00	7.000,00	0,42
Cáceres	BTD	1.566.720	MTD	46.361,66	34.000,00	7.000,00	0,86
<b>TOTAL:</b>				<b>648.580,21</b>	<b>407.100,00</b>	<b>77.000,00</b>	<b>0,71</b>

Las tarifas contratadas actualmente son en baja tensión (BTD); sin embargo, en el cuadro se observa que en todos los casos la tarifa más económica es la de media tensión (MTD), y las inversiones requeridas se amortizan en un período de tiempo inferior a un año en promedio, considerando que en tarifa MTD se tendrá que pagar por las pérdidas en el transformador, y habrá un costo adicional correspondiente al mantenimiento de los transformadores.

En el gráfico 7.1 se presenta el costo por la energía consumida en cada planta para el conjunto de las plantas bajo estudio, así como también los costos por pérdidas de energía en los transformadores, y los costos por mantenimiento de los mismos, asociados a las cuatro tarifas analizadas. En dicho gráfico se aprecia claramente que la tarifa MTD es la que resulta más económica de las cuatro opciones.

**GRÁFICO 7.1** Comparación de costos por tarifa



Como se puede observar en el ejemplo, no existe una metodología específica para este análisis; sin embargo, el análisis se puede adecuar al esquema tarifario que corresponda a la empresa de agua y saneamiento.

### Control de la demanda

En la mayoría de los países centroamericanos el costo de la energía eléctrica tiene un valor diferente de acuerdo con la hora del día en que se utilice. Este tipo de tarifa –que en muchas ocasiones se emplea en la contratación del servicio para los sistemas de agua y saneamiento– se conoce como “tarifa horaria”. En este tipo de tarifas existe un horario conocido como “horario punta”, en el cual generalmente el costo unitario de la energía es mucho más alto que en el resto del día. En instalaciones en donde el suministro de energía eléctrica esté contratado en este tipo de tarifa, se recomienda analizar las alternativas para la implantación de una medida de ahorro que consiste en administrar el consumo en este período punta. A este esquema se le conoce como “esquema de control de la demanda”, y por medio del mismo se trata de disminuir la carga hidráulica en operación durante el horario punta, para bajar con ello el monto de la demanda facturable de energía atribuible a ese período, y como consecuencia el importe global que se paga a la compañía suministradora.

El control de la demanda podrá realizarse mediante cualquiera de los siguientes métodos:

- a) Modificación de los procedimientos de operación para disminuir la carga en el horario punta.
- b) Instalación de temporizadores para parar equipos antes del inicio del horario punta y ponerlos en operación al término de dicho horario.
- c) Implementación 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 plan son los siguientes:

**Paso 1.** Calcular la demanda facturable promedio actual, así como también los consumos de energía promedio en horarios punta, intermedio y base.

**Paso 2.** Determinar las condiciones hidráulicas que se tendrán para parar en horario punta, así como también las que se tendrán que implementar fuera de dicho horario, 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 también el número de horas de operación al mes, de manera que se pueda determinar la energía que se consumirá en cada uno de los horarios.

**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.

## MEDIDAS PARA LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS EN LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS

### Mejorar el enfriamiento de los transformadores

En caso de que, durante la campaña de medición, las temperaturas registradas por el transformador sean elevadas o se encuentren en un rango fuera de lo normal, se pueden producir pérdidas significativas de energía eléctrica. En este caso, se debe evaluar el costo para corregir dicha falla. La evaluación se realiza de la forma siguiente:

- Situación observada durante la auditoría: las pérdidas de energía eléctrica en el transformador representan más del 2% del consumo total de la energía.
- Acciones a implantar: de acuerdo con la problemática en particular, se deberán aplicar las acciones que se especifican en el cuadro 7.2.

**CUADRO 7.2** Acciones recomendadas para mejorar las condiciones en un transformador

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 la 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 mediante la apertura de ventanas para ventilación del local.
El transformador presenta una alta temperatura de operación, debido a las altas temperaturas ambientales.	Instalar un sistema de ventilación forzada al transformador.

- Metodología de cálculo:

**Paso 1.** Calcular la eficiencia con la que trabajará el transformador, siguiendo la metodología de cálculo descrita en la sección sobre cálculo de pérdidas en el transformador del capítulo 6 del presente manual.

**Paso 2.** Calcular la disminución de la potencia eléctrica que demandará el transformador una vez implementada la acción correctiva, mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{et} = \frac{\eta_{trans}}{\eta_{trans'}} P_{et}$$

Donde:

$\Delta P_{et}$  = disminución de la potencia eléctrica esperada (kW).

$P_{et}$  = potencia eléctrica que demanda el equipo actualmente (kW).

$\eta_{trans}$  = eficiencia actual del transformador (-).

$\eta_{trans'}$  = eficiencia esperada del transformador (-).

**Paso 3.** Calcular los ahorros de energía.

Nota: Para los casos en que se presenten pérdidas por incremento de temperatura y se tengan que instalar dispositivos de enfriamiento (ventiladores), se deberá 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.

## **Incrementar el calibre de los conductores**

En caso de que se haya detectado que los calibres de los conductores no corresponden al 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 la auditoría: 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  $\Delta V$  como la diferencia entre las dos mediciones efectuadas.
- d) Calcular la resistencia unitaria mediante la siguiente ecuación:

$$R_u = \frac{\Delta V_{voltaje}}{I * L_0}$$

Donde:

$R_u$  = resistencia real del conductor ( $\Omega/m$ ).

$\Delta V_{voltaje}$  = caída de voltaje (V).

$I$  = corriente (A).

$L_0$  = 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 de esta medida de ahorro de energía mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{et} = \frac{(R_r - R'_r) * I^2 * L_c}{1000}$$

Donde:

$\Delta P_{et}$  = disminución de las pérdidas eléctricas (kW).

$R_r$  = resistencia real del conductor actual ( $\Omega/m$ ).

$R'_r$  = resistencia del conductor propuesto ( $\Omega/m$ ).

$I$  = corriente (A).

$L_c$  = longitud total del conductor (m).

**Paso 3.** Calcular los ahorros de energía eléctrica.

**Paso 4.** Calcular el valor de las obras asociadas al cambio de conductores.

**Paso 5.** Evaluación técnico-económica de la conveniencia del cambio.

## **Optimizar el factor de potencia (FP)**

El objetivo de esta medida será eliminar los problemas ocasionados por un bajo factor de potencia (FP). En general, un valor por debajo del 90% amerita tomar acciones que resultan muy rentables para compensarlo y alcanzar valores cercanos a la unidad.

El mecanismo para identificar el ahorro por esta medida es el siguiente:

- Situación observada durante la auditoría: el factor de potencia en el equipo de bombeo registrado por la compañía suministradora u obtenido durante la medición de parámetros eléctricos en campo es menor a 0,90 (o 90%).
- Acciones a implantar: si el bajo factor de potencia se origina por motores sobredimensionados o que trabajan 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 FP 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 siguiente ecuación:

$$C_o = P_e \left\{ \frac{\sqrt{I - FP^2}}{FP} - \frac{\sqrt{I - (0.97)^2}}{0.97} \right\}$$

Donde:

$C_o$  = capacidad requerida del capacitor (kVar).

$P_e$  = potencia eléctrica demandada por el motor (kW).

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 FP que alcanzará la instalación con el banco de capacitores propuesto, mediante la siguiente ecuación:

$$FP = \frac{P_e}{\sqrt{P_e^2 + (Pr-C_0)^2}}$$

Donde:

Pr = potencia reactiva que demanda el motor, obtenida durante las mediciones de campo.

**Paso 3.** Calcular los ahorros de energía eléctrica reduciendo los efectos descritos en la sección sobre el análisis del FP del capítulo 6 del presente manual.

**Paso 4.** Comparar el ahorro económico resultante con el costo de la instalación del banco de capacidores para evaluar la rentabilidad de dicha medida, siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo 4 de este manual.

## MEDIDAS PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE LOS MOTORES

### Corregir los desbalances de voltaje

- Situación observada durante la auditoría: existe un desbalance de voltaje en la alimentación eléctrica al motor y, por lo tanto, este está trabajando con una eficiencia depreciada.
- Acciones a implantar: de acuerdo con el origen del desbalance en voltaje, implantar las acciones que se detallan en el cuadro.

**CUADRO 7.3** Acciones recomendadas para corregir el desbalance de voltaje de alimentación a los motores eléctricos

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 voltaje.	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 una falta de balanceo en las cargas del transformador.	Balancear las cargas del transformador.

- 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 siguiendo los pasos que se detallan a continuación.

**Paso 1.** Calcular la eficiencia a la que trabajará el motor, una vez corregido el desbalance de voltaje, siguiendo el procedimiento descrito en la sección sobre cálculo de pérdidas y eficiencia del motor presentada en el capítulo 6 del presente manual.

**Paso 2.** Calcular la potencia eléctrica que demandará el equipo una vez implementada la acción correctiva.

**Paso 3.** Calcular los ahorros a lograrse.

### **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. Esta medida es altamente recomendable cuando el motor sufre una falla y es necesario repararlo.

- Metodología de cálculo: para evaluar los beneficios y la rentabilidad de esta medida, se siguen los siguientes pasos:

**Paso 1.** Calcular la eficiencia a la que trabaja el motor actual.

**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.** Calcular los ahorros de energía a obtener. Cotizar el motor de alta eficiencia propuesto y evaluar la rentabilidad.

Recordar que un motor de alta eficiencia tiene corrientes de partida mayores a las estándares; además, el tamaño de un motor de este tipo es mayor, lo que deberá incluirse en la factibilidad técnica de su cambio.

### **Optimización de la eficiencia del motor**

La auditoría 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, de acuerdo con la condición anómala encontrada. En el cuadro 7.4 se presentan las acciones correctivas recomendadas para los motores eléctricos que trabajan en condiciones de operación ineficiente.

**CUADRO 7.4** Acciones recomendadas para corregir condiciones de operación inefficiente de los motores eléctricos

Condición observada	Diagnóstico	Acción correctiva propuesta
Voltaje de alimentación por debajo del nominal	El voltaje en el punto de acometida está por debajo del nominal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Corregir con los taps del transformador. (Los taps son los componentes físicos en forma de manija –cambiadores– de un transformador, que se utilizan para graduar la relación de transformación del voltaje y ajustar el voltaje de salida al motor para absorber las variaciones del suministrador).</li> <li>b) Solicitar al suministrador que corrija el problema.</li> </ul>
	El voltaje en el punto de acometida presenta variaciones mayores al 5%.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Solicitar al suministrador que corrija el problema.</li> </ul>
	El voltaje en el punto de acometida es el nominal y no presenta variaciones significativas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Corregir con los taps del transformador.</li> <li>b) Practicarle un diagnóstico y mantenimiento al transformador.</li> </ul>
Desbalance del voltaje de alimentación al motor	El voltaje en el punto de acometida está desequilibrado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Solicitar al suministrador que corrija el problema.</li> </ul>
	El voltaje en la acometida está balanceado y en el secundario del transformador está desequilibrado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Practicar un diagnóstico y mantenimiento al transformador.</li> </ul>
	El voltaje en los bornes del secundario del transformador está balanceado y en la alimentación al motor se encuentra desequilibrado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Revisar la conexión de puesta a tierra del transformador y el motor, y en caso de que se detecten problemas, corregirlos.</li> <li>b) Revisar las conexiones del CCM, arrancador y motor, y en caso de que se detecten problemas, corregirlos.</li> </ul>
Desbalance en la corriente demandada por el motor	El desbalance en corriente es inversamente proporcional al desbalance en voltaje.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Corregir el desbalance en voltaje.</li> </ul>
	El desbalance es producido por una demanda desequilibrada por las fases del motor.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Si el desbalance es menor al 5%, practicarle un mantenimiento al motor.</li> <li>b) Si el desbalance es mayor al 5%, sustituir el motor por un motor nuevo de alta eficiencia.</li> </ul>
La velocidad de operación del motor está por debajo de la velocidad a plena carga	Problemas con rodamientos y/o cojinetes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Lubricar y, en su caso, sustituir los elementos con problemas.</li> </ul>
	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.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Sustituir el motor actual por un motor nuevo de alta eficiencia, de una capacidad tal que opere cerca del 75% de su capacidad.</li> </ul>
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.	

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.

### 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 determinado durante la AE 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 consiste en considerar 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 conlleva los pasos descritos a continuación.

**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 el 80%.
- Verificar la eficiencia del motor y de la bomba seleccionados.
- Calcular la eficiencia electromecánica combinando ambas eficiencias por medio de esta ecuación:

$$\eta_{em} = \eta_b * \eta_m$$

**Paso 2.** Calcular la potencia eléctrica que demandará el equipo una vez implementada la acción correctiva, mediante la ecuación siguiente:

$$P_{emb'} = P_{ebm} * \frac{\eta_{em}}{\eta'_{em}}$$

Donde:

$P_{emb'}$  = potencia eléctrica esperada con el conjunto motor-bomba de mejor eficiencia (kW).

$P_{ebm}$  = potencia eléctrica que demanda el conjunto motor-bomba actualmente (kW).

$\eta_{em}$  = eficiencia actual del conjunto motor-bomba (-).

$\eta'_{em}$  = eficiencia esperada de la bomba (-).

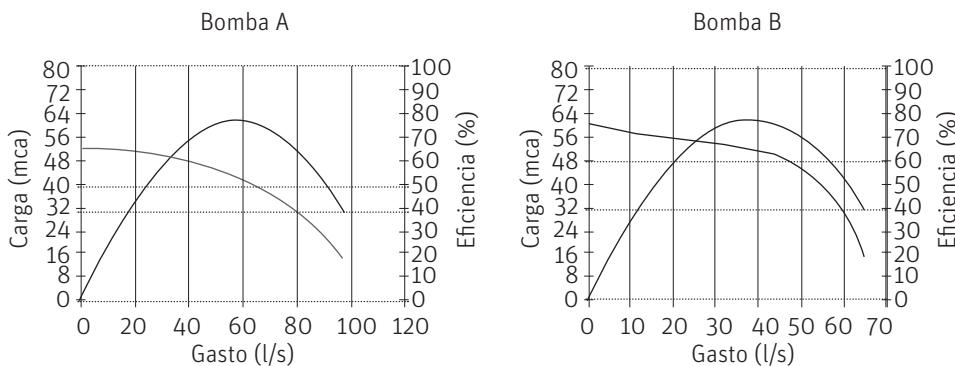
**Paso 3.** Calcular los ahorros a obtener.

**Paso 4.** Cotizar el conjunto motor-bomba propuesto y evaluar la rentabilidad.

- 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 estos detalles:

- 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, en el gráfico 7.2 se muestra en 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 resultaría más favorable cuando es más estable el nivel.

**GRÁFICO 7.2** Curva típica de dos equipos de bombeo con curvas H-Q diferentes



Se recomienda que una vez instalado el equipo se verifique el punto de operación del mismo y, de ser necesario, se efectúen las adecuaciones correspondientes.

## MEDIDAS PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE LAS BOMBAS

### Adecuación del equipo de bombeo al punto de operación real

En el caso de esta medida, el procedimiento para determinar una recomendación consiste en definir al menos dos puntos de operación carga-gasto donde opere el equipo de bombeo. Posteriormente, se deberán analizar las características del equipo instalado y evaluar si es recomendable una adecuación del mismo a las condiciones de operación reales (por ejemplo, reducción del número de tazones, recorte de impulsores, cambio de impulsores, o sustitución del equipo de bombeo). Sin embargo, toda modificación puede generar cambios de diseño, a saber: un recorte en el diámetro de salida del impulsor puede cambiar las curvas de eficiencia de las bombas; por ello, esta tarea debe realizarse de común acuerdo con el fabricante.

En el cuadro 7.5 se indican algunas acciones que pueden efectuarse para incrementar la eficiencia de la bomba, según el tipo de problemática.

**CUADRO 7.5** Acciones recomendadas para ajustar las curvas del equipo de bombeo a la condición real de operación

Tipo de bomba	Ubicación del punto de operación	Acción correctiva
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.
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.

- Metodología de cálculo de ahorros:

**Paso 1.** Calcular la potencia eléctrica que demandará el equipo una vez implementada la acción correctiva, mediante la siguiente ecuación:

$$P_e' = P_e * \frac{\eta_m}{\eta_m'}$$

Donde:

- $P_e$  = potencia eléctrica demandada por el motor actual (kW).
- $P_e'$  = potencia eléctrica que demandará el motor propuesto (kW).
- $\eta_m$  = eficiencia de operación del motor actual (-).
- $\eta_m'$  = eficiencia de operación del motor propuesto (-).

**Paso 2.** Calcular los ahorros por lograr.

- Disminución de la potencia eléctrica demandada  $\Delta P_e$ :

$$\Delta P_e = P_e - P_e'$$

- Disminución de la energía eléctrica consumida  $\Delta E$ :

$$\Delta E = \Delta P_e * H_{oa}$$

Donde  $H_{oa}$  es el número de horas de operación anual.

- Disminución de la facturación eléctrica  $\Delta F$ :

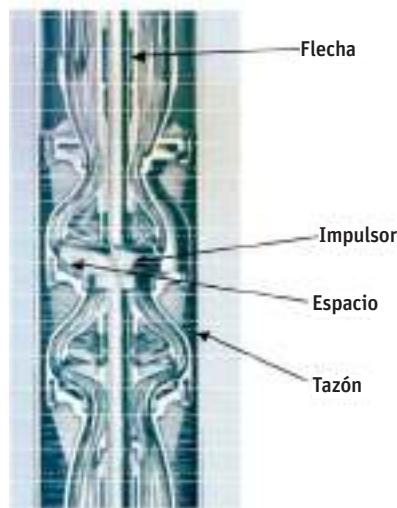
$$\Delta F = \Delta E * CUE$$

Donde CUE es el costo unitario de la energía (\$/kWh).

#### Ajuste de la posición de los impulsores en bombas de turbina con impulsor abierto

- Situación observada durante la auditoría: 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 el gráfico 7.3 se muestra el arreglo de los impulsores dentro del cuerpo de tazones de la bomba.

**GRÁFICO 7.3** Diagrama de una bomba de turbina de flecha de impulsor abierto y sus componentes



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 (véase el gráfico 7.4).

**GRÁFICO 7.4** Diagrama de un motor flecha hueca acoplado a una bomba de turbina



Fuente: Manual de operación Byron Jackson para bombas de turbina.

**Paso 2.** Desmontar el tornillo de seguridad, que impide se mueva la tuerca.

**Paso 3.** Una vez que la tuerca esté libre, se deberá aflojar hasta el momento en que ya no sostenga 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, esto indica un desgaste del impulsor con el tazón.

**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 acomodar la flecha de acuerdo con las especificaciones del fabricante, mediante el ajuste de la tuerca, subiendo la distancia recomendada por el fabricante, la cual depende del diámetro de la flecha y de la carga hidráulica.

• Metodología de cálculo de ahorros:

**Paso 1.** Determinar la eficiencia  $\eta_b$  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 la sección sobre evaluación de la eficiencia electromecánica del capítulo 6 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.

## REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE CARGA

### Corrección de defectos en la configuración de tuberías de descarga y en la operación

- Situación observada durante la auditoría: este punto aplica para aquellos sistemas de bombeo que durante la AE 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, o contrapresiones que impidan el flujo adecuado desde un equipo determinado, entre otras.
- Acciones a implantar: las recomendaciones en este caso consistirán en la modificación de los trenes de descarga o la 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.

### 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 la auditoría: la velocidad del agua dentro de la tubería es superior a 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 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 existen en la tubería actual y en la tubería propuesta mediante la metodología descrita en el capítulo 6.
- Paso 2.** Calcular la disminución de la potencia eléctrica demandada por el motor mediante la ecuación siguiente:

$$\Delta P_e = \left[ \frac{(h_{fta} - h_{ftp}) * Q * \gamma * g}{\eta_{em} * 1000} \right]$$

Donde:

- $\Delta P_e$  = disminución de la potencia eléctrica demandada (kW).
- $h_{fta}$  = 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 ( $m^3/s$ ).
- $\gamma$  = peso específico del agua ( $kg/m^3$ ).
- $g$  = aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).
- $\eta_{em}$  = eficiencia electromecánica del sistema de bombeo involucrado (-).

**Paso 3.** Calcular los ahorros de energía eléctrica.

**Paso 4.** Cotizar la obra implícita para el cambio de la tubería propuesta y evaluar la rentabilidad.

## REDUCCIÓN DE FUGAS

### Implementar una campaña de detección y eliminación de fugas

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 el ajuste continuo de procedimientos y acciones, con el fin de aumentar la eficacia de la conservación y del mantenimiento de la red de distribución.

El control de fugas de agua es una actividad continua en tiempo y espacio, durante la cual se establecen los procesos para coordinar las acciones de localización y eliminación de fugas, sobre la base de un monitoreo continuo de la red, 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 recopilan información y datos para la reducción de fugas (por ejemplo, personal, presupuesto, procedimientos, equipos, resultados e indicadores).
- 3) Se determinan las causas de la ocurrencia de pérdidas de agua, y se señalan los problemas principales, los equipos y recursos humanos necesarios, y 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) Despues se inicia el proceso de eliminación de pérdidas y se implementa el 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 siguientes indicadores:
  - a) Porcentaje de pérdidas potenciales = volumen de pérdidas / volumen producido.
  - b) Relación costo-beneficio de la reducción y control = costo de acciones / costo del agua recuperada.

En el cuadro 7.6 se presentan las actividades específicas que se deben desarrollar en un programa de control de fugas de sistemas de agua potable.

**CUADRO 7.6** Secuencia de actividades para implementar un programa de control de fugas

Prioridad	Acción específica	Costo unitario (centavos de US\$/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, cómputos, cuadrillas de campo y herramientas.	14
2	Implantación de los procedimientos de recepción, análisis, canalización y seguimiento de los reportes de fugas.	11
3	Gestión ante la compañía de telefonía para la asignación de números telefónicos fácilmente memorizables para atender reportes del público.	1
4	Diseño, elaboración e implantación de formatos de campo y de recepción de reportes.	5
5	Promoción de la colaboración del público para el reporte de fugas mediante publicidad, procedimientos y acuerdos de coordinación.	5
6	Establecimiento de una reserva mínima de materiales de uso frecuente para reparación.	82
7	Mantenimiento y reposición de equipos, herramientas y vehículos.	29
8	Programa de pruebas de muestreo en campo para identificar la ocurrencia de fugas.	15
9	Programa de búsqueda sistemática de fugas visibles en tomas domiciliarias de acuerdo con las estadísticas de fugas.	12
10	Programa de evaluación sistemática del estado de válvulas.	12
11	Programa de búsqueda sistemática de fugas visibles en tuberías principales y secundarias de acuerdo con las estadísticas de fugas.	8
12	Adquisición de equipos detectores de fugas y localización de metales.	43
13	Programa de búsqueda sistemática de fugas ocultas en tomas domiciliarias y tuberías principales.	12
14	Implantación de un sistema de monitoreo en tiempo real y de información geográfica para búsqueda y detección de fugas ocultas.	23

## MEJORAR LA OPERACIÓN

### Instalación de variadores de frecuencia

- Situación observada durante la auditoría: 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 la AE, 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 siguiente forma:

**Paso 1.** Seleccionar los equipos resultantes como viables y considerar sus consumos energéticos operando sin variador de frecuencia<sup>1</sup>, así como también las presiones y caudales registrados durante los monitoreos.

El monitoreo se debe realizar durante 24 horas, con al menos una lectura por hora de los siguientes parámetros:

- Presión de descarga (kg/cm<sup>2</sup>).
- Caudal (m<sup>3</sup>/s).
- Potencia eléctrica demandada por el motor (kW).

El registro de datos se podrá hacer en un formato como el que se presenta a continuación.

Fecha	Hora (mínimo 24 horas)	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Potencia (kW)

**Paso 2.** Seleccionar la presión óptima de operación para cada sistema de distribución de agua potable, en función de las siguientes consideraciones:

---

<sup>1</sup> En los variadores de frecuencia, las pérdidas, los armónicos y el factor de potencia dependen de la tecnología de fabricación, por lo tanto, no es posible calcular, por lo que la norma obliga a que los fabricantes declaren los valores de esos factores; según lo anterior, para calcular las pérdidas en los variadores de frecuencia hay que considerar lo siguiente:

- 1) Las pérdidas en el variador de frecuencia se obtienen de un catálogo del equipo o, en su defecto, se deberá medir con un vatímetro la potencia activa en bornes de motor y la potencia activa a la entrada del variador, y obtener las pérdidas por la diferencia de las mediciones.
- 2) Se deberán incluir las armónicas producidas por el variador de frecuencia, que se obtienen de un catálogo del equipo o, en su defecto, se deben medir con un analizador de red.
- 3) Se debe medir el factor de potencia a la entrada del variador de frecuencia.

- i) 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. Esta 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.
- ii) 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 qué valor es posible bajar la presión, sin menoscabo del servicio. Dicho valor de presión será la presión óptima de operación.
- iii) 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 qué valor es necesario subir la presión para que el agua alcance la presión adecuada en todos los puntos de la red. Dicho valor de presión será la presión óptima de operación.

**Paso 3.** Calcular la energía eléctrica que se ahorrará de acuerdo con el procedimiento que se describe a continuación.

- i) Calcular el perfil de presión disminuida.

Para cada uno de los registros obtenidos durante el monitoreo, calcular la disminución de la presión y 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 ( $\text{kg/cm}^2$ ).

$p_r$  = presión registrada en el monitoreo ( $\text{kg/cm}^2$ ).

$\Delta p_r$  = disminución de la presión para ese registro ( $\text{kg/cm}^2$ ).

- ii) 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 siguiente ecuación:

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

Donde:

$\Delta P_e$  = potencia eléctrica ahorrada ( $\text{kW}$ ).

$\Delta p_r$  = disminución de la presión de descarga ( $\text{mca}$ ).

$Q$  = caudal ( $\text{l/s}$ ).

$\eta_{em}$  = eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba.

- iii) Calcular la energía ahorrada con la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \sum_{i=2}^{n_{lm}} \left[ \frac{(\Delta P_{e,i} + \Delta P_{e,i-1})}{2} * (h_{r,i} - h_{r,i-1}) \right]$$

Donde:

$\Delta E$  = energía ahorrada en el período de medición (24 horas) (kWh/periodo).

$\Delta P_{e,i}$  = potencia eléctrica ahorrada en la lectura i (kW).

$h_{r,i}$  = hora a la que se tomó la lectura i (h).

$n_{lm}$  = número total de lecturas tomadas durante el tiempo de monitoreo (1/año).

- iv) Calcular los ahorros anuales que se obtendrán con la implantación de la medida utilizando la siguiente ecuación:

$$A\$ = \Delta E * CUE$$

Donde:

$A\$$  = ahorro económico anual que se obtendrá con la implementación del variador (\$/año).

$\Delta E$  = 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.

### 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 que trabaja a gasto medio y, por ende, la potencia eléctrica del mismo. Esta situación se analiza a continuación.

- Situación observada durante la auditoría: el suministro de agua se efectúa directo a red con una potencia exigida de acuerdo con el gasto máximo horario.
- Acciones a implantar: instalar un tanque de regulación o utilizar algún tanque disponible, y reducir la potencia del equipo de bombeo.
- Metodología de cálculo:

**Paso 1.** Calcular el caudal y la carga hidráulica total que tendrá el equipo de bombeo trabajando 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 siguiente ecuación:

$$P_{eQm}' = \frac{H_{tmb} * Q}{(H_{tmb} * Q)} * P_{eQm}$$

Donde:

$P_{eQm}'$  = potencia eléctrica esperada con el caudal medio (kW).

$P_{eQm}$  = potencia eléctrica que demanda el conjunto motor-bomba actualmente con el caudal medio (kW).

$(H_{tmb} * Q)$  = producto de la carga hidráulica por el caudal actual del conjunto motor-bomba ( $m^3/s$ ).

$(H_{tmb} * Q)'$  = producto de la carga hidráulica por el caudal esperada del conjunto motor-bomba ( $m^3/s$ ).

**Paso 3.** Calcular los ahorros de energía eléctrica.

**Paso 4.** Cotizar la obra que implica la instalación del nuevo tanque y conjunto motor-bomba propuestos y evaluar la rentabilidad.

## MEJORAR EL MANTENIMIENTO

### Mantenimiento preventivo y predictivo

Como parte del plan de ahorro de energía, se debe recomendar la implementación de un programa de mantenimiento predictivo y preventivo en caso de que la empresa lo tenga. Dentro de los principales beneficios que se obtienen con un buen programa de mantenimiento de las instalaciones, cabe destacar los que se detallan a continuación:

- a) Mayor disponibilidad del equipo.
- b) Mayor capacidad de bombeo.
- c) Mayor confiabilidad en el equipo.
- d) Operación mejor planificada 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.

Para mayor detalle de la auditoría al mantenimiento y de las acciones recomendadas, consultese el *Manual de mantenimiento para sistemas de bombeo de agua* o el programa de mantenimiento de la empresa de agua.

## REEMPLAZO DE LA FUENTE DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

### Uso de fuentes de energía renovable

Desde tiempos remotos, las energías renovables han constituido una parte importante de la energía utilizada por los humanos, especialmente la solar, la eólica y la hidráulica. La navegación a vela, los molinos de viento o de agua y el diseño arquitectónico de los edificios para aprovechar la luz solar son buenos ejemplos de ello.

Hacia los años setenta las energías renovables comenzaron a considerarse una alternativa viable frente a las energías tradicionales o convencionales, tanto por su disponibilidad presente y futura garantizada, como por su menor impacto ambiental en el caso de las energías limpias, y por esta razón fueron llamadas energías alternativas. Actualmente muchas de estas energías son una realidad, no una alternativa, por lo que el nombre de alternativas ya no debe emplearse. En 2007 el porcentaje del uso de energías renovables a nivel mundial como fuente de energía primaria representó el 14,5%, y el porcentaje de generación de energía eléctrica el 20,1% del total.

Las fuentes renovables de energía pueden dividirse en dos categorías: no contaminantes o limpias y contaminantes.

Las contaminantes se obtienen a partir de la materia orgánica o biomasa<sup>2</sup>, y se pueden utilizar directamente como combustible (madera u otra materia vegetal sólida), bien convertida en bioetanol o biogás mediante procesos de fermentación orgánica, o en biodiesel, mediante reacciones de transesterificación y de los residuos urbanos.

En los sistemas de agua potable se puede obtener energía a partir de los lodos de las centrales depuradoras y potabilizadoras de agua. Esta energía también es contaminante, pero de todas formas lo sería en gran medida si no se aprovechara, pues los procesos de descomposición de la materia orgánica se realizan con emisión de metano y de dióxido de carbono.

Entre las energías no contaminantes se encuentran (de acuerdo con su fuente):

- El Sol: energía solar.
- El viento: energía eólica.
- Los ríos y corrientes de agua dulce: energía hidráulica.
- Los mares y océanos: energía mareomotriz.
- El calor de la Tierra: energía geotérmica.
- Las olas: energía undimotriz.
- La llegada de masas de agua dulce a masas de agua salada: energía azul.

### ***Aplicación de la energía solar en sistemas de agua potable***

En los sistemas de agua potable hay un buen número de sistemas y subsistemas que pueden utilizar la energía solar, entre ellos:

- Sistemas de cierre automático de válvulas, tanques y válvulas de control.
- Monitoreo de presiones y calidad del agua.
- Bombeo en pequeños sistemas de agua potable, que pueden ser empleados en zonas rurales donde no hay suficiente presión para el suministro de la red de agua potable, o en zonas alejadas de la red de energía eléctrica.

### ***La energía eólica en sistemas de agua potable***

La generación de energía eólica en forma complementaria a la realizada por el tendido de la red eléctrica existente permite resolver los problemas de abastecimiento y seguridad de energía de agua potable en comunidades rurales, con efectos económicos inferiores a los de un sistema convencional.

Una solución energética híbrida con un arreglo eólico y respaldo con máquinas diesel en proyectos de agua potable rural (APR) es altamente atractiva y costo-efectiva, dado que se trata de tecnologías complementarias, y esto permite no solo reducir costos sino también aumentar la seguridad del sistema, dado que:

- La energía eólica tiene costos de mantenimiento muy pequeños, lo que hace que los costos de producción de agua disminuyan considerablemente.
- Muchos sistemas APR que se encuentran actualmente en funcionamiento cuentan con sistemas que implican grandes gastos en consumo de energía eléctrica, y podrían cubrir parte de sus necesidades energéticas con energía eólica.

---

<sup>2</sup> Cabe destacar que si bien la biomasa puede contaminar en su fase de combustión, también es cierto que en su fase de crecimiento capta dióxido de carbono y, por lo tanto, posee una emisión neta de valor cero.

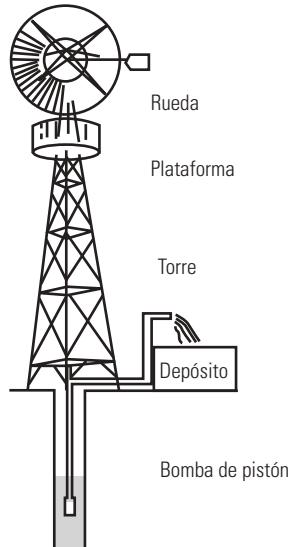
Para implementar un sistema de generación eólica se requiere seleccionar un sitio con alto potencial y desarrollar registros confiables de velocidades de vientos, que permitan evaluar adecuadamente el recurso eólico y la potencia eólica a instalar. La elección de un buen sitio de potencial eólico permite disminuir el tamaño del molino de viento y con esto también los costos iniciales, que son los más importantes en un proyecto de este tipo.

La información sobre el viento tiene que ser recopilada directamente en el sitio a desarrollar, utilizando anemómetros o sensores de viento instalados por un período mínimo de seis meses.

Los molinos de viento o aerogeneradores son máquinas muy simples, que transforman la energía mecánica del viento en energía mecánica para el bombeo, por lo que para un sistema de bombeo resultan muy eficientes, dado que no requieren pasar a otra forma de energía como la eléctrica. Para realizar esta operación, en forma eficiente y económica, la seguridad del sistema se logra por medio de estanques de acumulación, cuyo volumen se determina a partir del estudio de vientos y consumo estimado. Se trata de equipos de bajo costo, muy simples, que utilizan bombas tipo pistón y requieren un mantenimiento mínimo. Por ejemplo, un sistema completo (sin pozo) para bombear un caudal de un litro por segundo tiene un costo aproximado de US\$3.400.

Las pequeñas turbinas eólicas se encuentran entre aproximadamente 1-10kW, y permiten suministrar energía eléctrica a proyectos APR para procesos de tratamiento y su propio funcionamiento. El costo de instalación de estos equipos es variable y depende principalmente de la lejanía del lugar y del costo de la torre, que asciende a cerca de un 50% del valor total de los equipos. Los costos actuales están entre US\$2 y US\$6 el watt instalado.

**GRÁFICO 7.5** Esquema de funcionamiento de un molino de viento para extraer agua subterránea



## **Producir y aprovechar biogás en las plantas de tratamiento de aguas residuales**

El biogás es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos (bacterias metanogénicas, etc.), y otros factores, en ausencia de aire (esto es, en un ambiente anaeróbico). Cuando la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno, actúa este tipo de bacterias, generando biogás.

## ***Aplicación de biogás en sistemas de agua potable***

La implementación de un sistema de biodigestores para la descontaminación (productiva) de aguas servidas con generación de biogás, y la posterior generación de energía eléctrica, es un proceso en el cual se obtiene un doble resultado:

- 1) La descontaminación de las aguas residuales, con lo cual se cumple y supera la normativa vigente.
- 2) La obtención del biogás como subproducto.

Este biogás puede utilizarse para la generación de energía eléctrica y/o térmica y permite aprovechar las excretas y los materiales orgánicos. La energía eléctrica puede generarse mediante el uso de un motor de combustión interna y su propio generador.



## Capítulo 8

### EVALUACIÓN DE LAS MEDIDAS DE AHORRO

#### EVALUACIÓN DE LOS AHORROS (BALANCE DE ENERGÍA ESPERADO)

Una vez que se han determinado las propuestas de ahorro, las especificaciones del equipo a cambiar y las actividades a realizar para el plan de ahorro de energía, se deberán evaluar las eficiencias, las pérdidas y el balance energético que se tendrá, y adoptar las medidas para poder determinar el ahorro total potencial esperado al implementar el plan de ahorro.

La nueva evaluación deberá realizarse de acuerdo con los componentes energéticos descritos en el capítulo 6 del presente manual, sustituyendo los datos de los equipos y tomando en cuenta las nuevas medidas de ahorro.

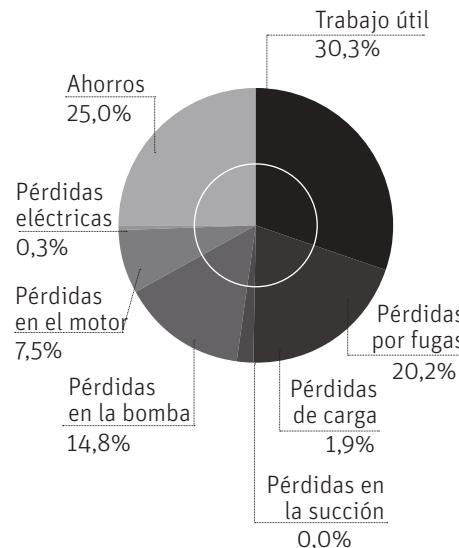
De acuerdo con las evaluaciones de los componentes de motor y conductores eléctricos, y con las especificaciones de la bomba nueva propuesta, y suponiendo que la bomba trabajará dentro del rango de máxima eficiencia en la curva de carga-caudal, se puede realizar nuevamente un balance de energía esperado cuando se implementen las medidas de ahorro propuestas.

El cálculo del balance esperado se efectúa de la misma forma en que se describe en el capítulo 6 del presente manual. En este caso, el balance esperado determina además el porcentaje de ahorro que se tendrá al implementar estas medidas de ahorro.

En el gráfico 8.1 se muestra un ejemplo del balance de energía esperado para un sistema de bombeo.

**GRÁFICO 8.1** Balance de energía esperado al implementar un plan de ahorro de energía

Párametro	Unidad	Cantidad
Consumo de energía	kWh/año	161.372
Potencia demandada	kW	18,4
Corriente	A	28,7
Factor de potencia	%	80%
Pérdidas eléctricas	kWh/año	585
Pérdidas en el motor	kWh/año	16.047
Pérdidas en la bomba	kWh/año	31.843
Pérdidas en la succión	kWh/año	89
Pérdidas de carga	kWh/año	4.092
Pérdidas por fugas	kWh/año	43.486
Trabajo útil	kWh/año	65.229
Ahorros	kWh/año	53.653



Como se puede observar, de acuerdo con el ejemplo, se esperan ahorros hasta de un 25% de la energía utilizada actualmente por el sistema de bombeo.

La evaluación económica de las medidas de ahorro es el paso final del proyecto de ahorro de energía, después del cual se podrá presentar un resumen ejecutivo de los resultados de la auditoría energética, además del cálculo de los indicadores esperados. A continuación, se describirá el cálculo de los ahorros, así como también los detalles de la integración del reporte ejecutivo y el cálculo de los índices energéticos más comunes.

## EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL AHORRO Y TASA DE RETORNO

### Paso 1. Cálculo de los ahorros.

El cálculo de los ahorros se determina a partir de un costo general de la energía eléctrica, y de los ahorros de energía obtenidos en la evaluación del balance de energía esperado, de acuerdo con los siguientes parámetros.

**Costo de la energía (CUE).** Se debe obtener el costo general de la energía eléctrica en unidades monetarias locales o en dólares de EE.UU., por kWh.

**Ahorros directos.** Son los ahorros esperados en forma directa al reducir las pérdidas de energía derivadas del nuevo balance energético una vez implementadas las medidas de ahorro sugeridas para cada sistema de bombeo. Este ahorro se obtiene del balance energético esperado en kWh/año. El costo del ahorro de energía se obtiene al multiplicar la energía ahorrada por el costo de la energía.

**Ahorros adicionales.** Se trata de los ahorros suplementarios que se tendrán al instalar el banco de captores, gracias a los ahorros por reducción de pérdidas en los conductores. En el caso en que trabajar con un bajo factor de potencia implique un costo adicional de multa por parte del suministrador del servicio de energía eléctrica, el costo de estas multas en el último año de operación también podrá añadirse a este análisis.

$$\text{Ahorro total anual (A}_{\text{eco}}\text{)} = \text{ahorros directos} + \text{ahorros adicionales}$$

### Paso 2. Cálculo del costo de las inversiones.

Debido a que las propuestas de ahorro implican la compra de equipo, materiales y realización de trabajos adicionales, se debe considerar el cálculo de la inversión correspondiente, para cada uno de los sistemas de bombeo en forma particular. Se sugiere incorporar en el cuadro las inversiones y un índice de recuperación de inversiones.

Para el cálculo de la inversión se deberán tomar en cuenta todos los costos de inversión que implica realizar el plan de ahorro de energía, es decir: se deben desglosar uno por uno los elementos de la propuesta de ahorro que impliquen compra de equipo, instalación y mano de obra.

### Paso 3. Análisis de la tasa de retorno de la inversión.

Por último, se debe realizar un análisis de la tasa de retorno de la inversión que se tendrá que efectuar para realizar el plan de ahorro de energía propuesto.

El cálculo del período simple de recuperación de la inversión se lleva a cabo con la siguiente ecuación:

$$n_{ri} = \frac{I_{mae}}{A_{eco}}$$

Donde:

$n_{ri}$  = período de recuperación de la inversión (años).

$I_{mae}$  = 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).

Una vez calculados todos los ahorros y la tasa de retorno de la inversión, se procede a realizar un resumen de los ahorros de energía globales distinguiendo las medidas convencionales o de rápida implementación y las medidas resultantes de la operación hidráulica.

El formato sugerido para concentrar y mostrar los potenciales de ahorro de energía se presenta en el cuadro 8.1.

**CUADRO 8.1** Formato de resumen de ahorros de energía derivados del plan de ahorro de energía

Descripción de la medida de ahorro	Consumo actual		Ahorros (1)		Porcentaje (2)	Inversión (3)	Tasa de retorno (años) (4)
	Energía (kWh/año)	Facturación (\$/año)	Energía (kWh/año)	Facturación (\$/año)			

A continuación se detallan los principales datos a llenar en el cuadro 8.1:

(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 el 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 (*payback simple*) dividiendo el valor de la inversión entre el ahorro económico anual (años).

Por último, 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.

## **ELABORACIÓN DEL REPORTE FINAL DEL PLAN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA**

El paso final de la auditoría de eficiencia energética es preparar un reporte que contenga las observaciones y conclusiones de dicha auditoría, con énfasis en las oportunidades de ahorro de energía, y el plan de acción para implantarlas, que debe comprender 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 que la alta gerencia de la empresa de agua y saneamiento pueda obtener en forma breve todos los resultados importantes, y entender de inmediato los resultados de la auditoría, así como también los costos y beneficios de las recomendaciones. El resumen no deberá de sobrepasar las cuatro cuartillas.

Este apartado deberá incluir un cuadro con el resumen de los ahorros de acuerdo con el modelo presentado en la sección anterior de este capítulo.

Los principales datos a integrar en el cuadro-resumen son los siguientes:

- Ahorros de energía y facturación anuales para cada medida de ahorro, que resultan 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, que se calcula dividiendo el ahorro por cada medida entre el consumo y el 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 logrado con medidas convencionales y con las medidas resultantes de la operación hidráulica.

**b. Descripción de la situación actual de las instalaciones evaluadas.** En esta parte, se dará a conocer la situación de las instalaciones de la empresa de agua en el momento en que se realizó la auditoría. Aquí deberá presentarse un resumen con datos básicos de las instalaciones, entre ellos:

- Datos generales de las instalaciones electromecánicas (equipos y condiciones).
- Una 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 punto se presentarán los datos recopilados y analizados con referencia al consumo energético en las instalaciones. La descripción de la situación energética deberá de venir acompañada por gráficos para una mejor comprensión de la información siguiente:

- Consumos energéticos anuales, incluida la demanda eléctrica máxima de todas las instalaciones y servicios contratados por la empresa.
- Tarifas eléctricas aplicables.
- Balance energético global de la empresa de agua.
- Variaciones mensuales de consumo de energía y producción (costos).
- Indicadores que sean aplicables a partir de los resultados del análisis y de los gráficos obtenidos.

**d. Recomendaciones y medidas de ahorro.** En esta parte, 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 de la empresa y las observaciones del equipo a auditar. 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 plan, como mínimo por el método del período de recuperación de la inversión y, de ser necesario, usando los métodos del valor presente neto y de la tasa interna de retorno.

**e. Apéndice.** En este apartado habrá que incluir los documentos de cotización de los equipos nuevos a comprar.







[www.iadb.org](http://www.iadb.org)