



La vivienda y el agua
son de todos

Minvivienda

10 años
2011 • 2021

GUÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA

Segunda Edición

Diciembre 2021



La vivienda y el agua
son de todos

Minvivienda

10 años
2011 • 2021



Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio

Jonathan Malagón

Ministro de Vivienda, Ciudad y Territorio

José Luis Acero

Viceministro de Agua y Saneamiento Básico

Hugo Bahamón

Director de Política y Regulación

Ana Victoria Mujica

Coordinadora del Grupo de Política y Regulación

Elaborado por:

Andrea Maldonado

Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.



Agradecimientos

Este estudio fue posible gracias al apoyo del pueblo y el gobierno de Estados Unidos, a través de su Agencia para el Desarrollo Internacional (USAID), bajo los términos del acuerdo entre agencias USAID/USFS AEG-T-00-07-00003 PAPA (Participating Agency Program Agreement). Las opiniones expresadas en este material no representan aquellas de USAID y/o las del gobierno de Estados Unidos de América.

El documento fue desarrollado en el marco de la Estrategia Colombiana de Desarrollo en Bajo Carbono, liderada por el Departamento Nacional de Planeación, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, y el Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio como cabeza del sector de agua y saneamiento básico.

Agradecemos los aportes y apoyo en la revisión de este documento a:

Jennifer Daw, Sustainability
Project Manager National
Renewable Energy Laboratory

José C. Porro, LEQUIA - University of Girona
Facultat de Ciències. Campus Montilivi s/n

Luis Javier Londoño Losada
Jefe Unidad Mantenimiento Equipos Provisión Aguas
Empresas Públicas de Medellín E.S.P

Germán Ignacio Figueroa Gallego
Profesional Mantenimiento Aguas
Área Mantenimiento Equipos
Empresas Públicas de Medellín E.S.P

Así mismo, agradecemos el soporte, colaboración y apoyo de: LEDS LAC Platform of the LEDS Global Partnership; Empresas Públicas de Medellín E.S.P (Ing. Jorge William Ramírez Tirado, Gerente Provisión Aguas) y Asociación Nacional de Empresas de Servicios Públicos y comunicaciones- ANDESCO (Dra. Ángela Escaria Director de las Cámaras de Acueducto Alcantarillado y Aseo).



Guía para la optimización energética en sistemas de agua potable o agua residual

Contenido

Introducción	5
1. Gestión Integral de Energía	6
1.1 Optimización de demanda energética	9
2. Optimización energética.....	12
2.1 Identificación del cumplimiento de la reglamentación técnica de energía y agua y saneamiento básico 12	
2.2 Balance de masa y energía	13
2.2.1 Consumo de energía en los sistemas de bombeo	14
2.2.2 Variables que afectan la demanda energética en los sistemas de bombeo	15
2.2.3 Metodologías de evaluación – Cálculo de pérdidas	16
3. Indicadores energéticos	22
3.1 Índice de consumo energético (IE)	22
3.2 Trabajo de bombeo (TB).....	22
3.3 Indicador de costo unitario de energía (CUE) (\$/kWh)	22
4. Medidas para el ahorro y eficiencia energética	23
4.1 Optimización de la Operación	27
4.1.1 Reducción de pérdidas de agua en la red.....	28
4.2 Incorporación de otras fuentes de suministro de energía	32
4.3 Medidas de eficiencia energética en sistemas de tratamiento de agua residual	32
4.3.1 Medidas relacionadas a los sistemas de aireación.....	32
4.3.2 Otras medidas.....	33
4.4 Medidas relacionadas con el suministro energético	34
4.4.1 Energía suministrada al sistema.....	34
4.4.2 Usuario final.....	35
Referencias Bibliográficas.....	36
ANEXO I. Descripción de mediciones a realizar.....	38
ANEXO II. Lecturas recomendadas	43



Introducción

La energía eléctrica puede representar entre un 10 y un 40% de los costos totales de la operación de los sistemas de tratamiento de agua (potabilizadoras y residuales), llegando en muchos sistemas a valores cercanos al 10% de los costos totales de un sistema de acueducto y/o alcantarillado, por lo cual es fundamental implementar medidas de eficiencia energética.

En Colombia, la mayoría de municipios cuentan con infraestructura para la potabilización, algunos con problemas de operación y mantenimiento, y además, se viene avanzando de manera significativa en la cobertura de tratamiento de aguas residuales, lo cual conlleva la necesidad de desarrollar y promover instrumentos orientados a hacer más eficiente la gestión de los prestadores de los servicios públicos domiciliarios.

Acorde con lo expuesto por el Ministerio de Minas y Energía, la eficiencia energética es la relación entre la energía aprovechada, y la total utilizada en cualquier proceso de la cadena energética, que busca ser maximizada a través de buenas prácticas de reconversión tecnológica o sustitución de combustibles. A través de la eficiencia energética se busca obtener el mayor provecho de la energía, bien sea a partir del uso de una forma primaria de energía, o durante cualquier actividad de producción, transformación, transporte, distribución y consumo de las diferentes formas de energía, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad vigente sobre el ambiente y los recursos naturales renovables. (Ley 1715 de 2014 y 2099 de 2021).

En el marco del Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 y de las acciones adelantadas por el Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico orientadas a desarrollar instrumentos técnicos, se estructuró la primera edición de esta guía con el objetivo de brindar lineamientos para apoyar principalmente, a grandes y medianos operadores de sistemas de agua potable y residual, a fin de mejorar la eficiencia energética de sus sistemas.

Esta línea se mantiene y se proyecta a 2030 acorde con el PND 2018 – 2022 ya que se plantea la implementación de la estrategia nacional de economía circular para aumentar el reciclaje de residuos, el reúso del agua y la eficiencia energética, bajo estas consideraciones y la capitalización de las experiencias en la implementación de la primera versión de la guía y la incorporación de este tema como una de las líneas del Plan Integral de Gestión de Cambio Climático Sectorial – PIGCCS, del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio adoptado por la Resolución 0431 del 31 de agosto de 2020, se desarrolla una segunda edición de esta herramienta.

La guía contiene los elementos básicos asociados a la Gestión Integral de Energía, centrándose en la planificación energética, para lo cual se presentan medidas de evaluación, indicadores y medidas de ahorro energético. Se espera que este documento se convierta en una herramienta para que los operadores puedan implementar un modelo de Gestión Integral de Energía, que les permita obtener reducciones en los costos operativos asociados al consumo energético.



1. Gestión Integral de Energía

La optimización energética se debe enmarcar dentro de una política de “Gestión Integral de Energía”, no es producto de una evaluación puntual. Por ello, se debe contar con el compromiso de la alta gerencia para poder establecer esquemas que permitan la mejora continua y la evaluación objetiva y cuantitativa a través de indicadores.

Esta herramienta permite apoyar a los prestadores de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado a realizar una buena gestión energética y reducir sus costos operativos. Para implementar una Gestión Integral de Energía las empresas pueden apoyarse en los siguientes elementos, para la planeación y desarrollo de su gestión:

- a. Guía para la Implementación de un Sistema de Gestión Integral de Energía, elaborada por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).
- b. Las normas ISO 50000.
 - ISO 50001, Sistemas de Gestión de Energía.
 - ISO 50002, Auditorías Energéticas.
 - ISO 50003, Guía y Requerimientos para Auditorías y Certificación de Sistemas de Gestión de Energía.
 - ISO 50004, Guía de Implementación, Mantenimiento y Mejora de Sistemas de Gestión de Energía.
 - ISO 50006, Indicadores de Rendimiento Energético, Línea Base, Principios y Guía.
 - ISO 50015, Medición y Verificación de Rendimiento Energético de las Organizaciones, Principios y Guía.
- c. Guía didáctica para el desarrollo de auditorías energéticas, documento elaborado por la UPME.
- d. Lineamientos del RETIE¹ que permite direccionar su operación energética, por pequeña que sea con seguridad y efectividad.
- e. Lineamientos del RAS.

Adicionalmente pueden hacer uso de los siguientes aplicativos informáticos:

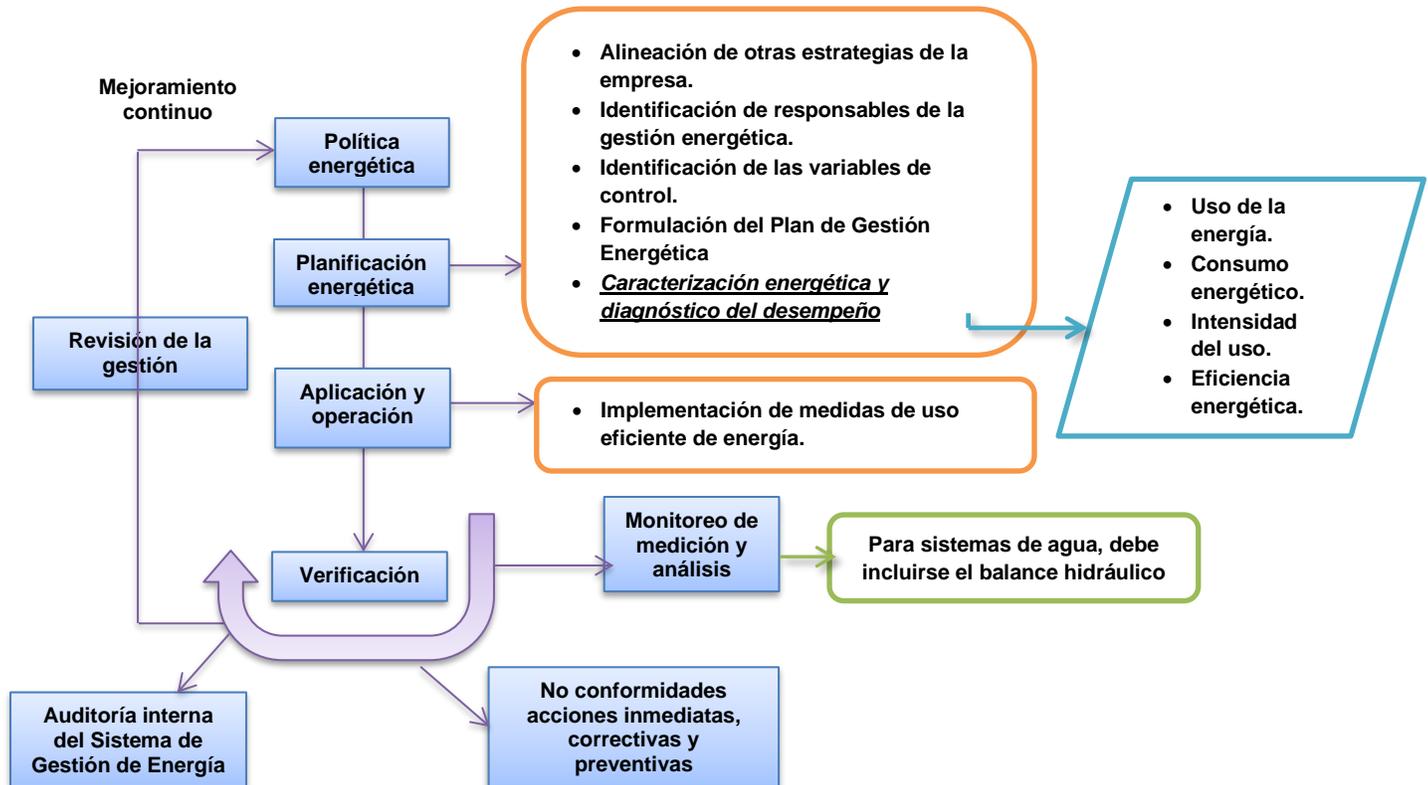
- Software diseñado para el seguimiento de los consumos energéticos de la industria, que puede ser descargado gratuitamente de la página web de la UPME, en el link de Sistemas de información de eficiencia energética y energías alternativas.
- Software de Gestión energética GenWEB, permite el seguimiento y control de las variables productivas que permite recopilar y analizar información de los consumos de los diferentes energéticos y compararlos con los niveles de producción de agua tratada, con el objetivo de mantener y mejorar los indicadores de productividad que se hayan podido alcanzar, permitiendo generar planes de ahorro para las empresas. Este Software fue desarrollado por la Universidad Pontificia Bolivariana y su licencia tiene un costo anual.

La Gestión

¹ El objeto fundamental de este reglamento es establecer las medidas tendientes a garantizar la seguridad de las personas, de la vida tanto animal como vegetal y la preservación del medio ambiente; previniendo, minimizando o eliminando los riesgos de origen eléctrico. Sin perjuicio del cumplimiento de las reglamentaciones civiles, mecánicas y fabricación de equipos (MME, 2013).

La estructuración de la Gestión basada en el Compromiso de la alta dirección considera los componentes a partir de la definición de políticas e implementación de esquemas de mejoramiento continuo como se presenta en la Figura 1.

Figura 1. Sistema de Gestión Integral de Energía (GIE)

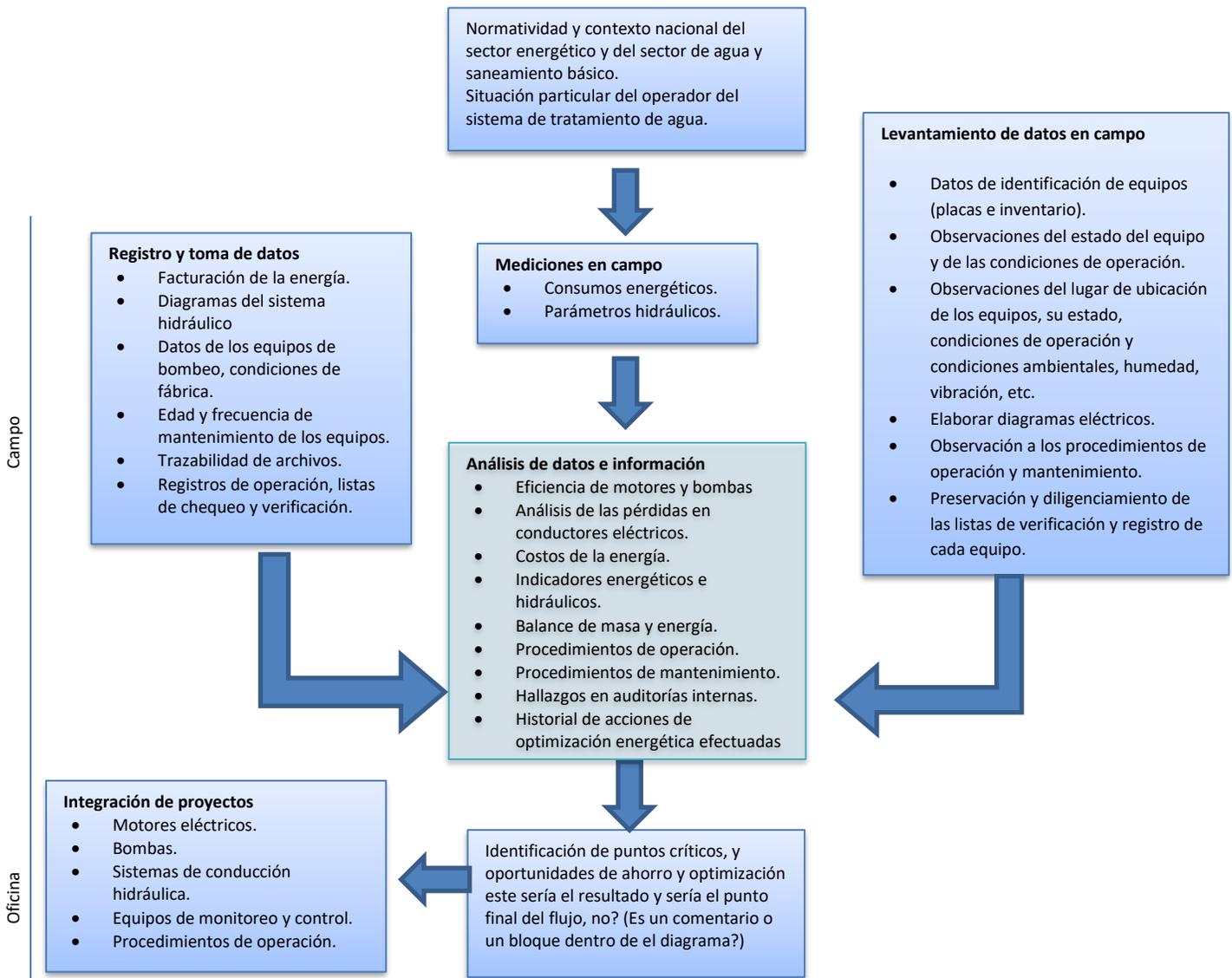


Fuente: Adaptado ISO 50001, 50006, 50015 y UPME, 2008.

Por su parte, la evaluación del desempeño energético requiere el levantamiento de la mayor cantidad de datos que finalmente generarán información cuantificable para poder implementar medidas que permitan tener en el sistema un uso eficiente de energía; en la Figura 2 se ejemplifican algunos de elementos que deben considerarse para el levantamiento de la información.



Figura 2. Levantamiento de información en el marco de GIE para sistemas de agua.



Fuente: Adaptado BID, 2011

Bajo el contexto de Gestión Integral de Energía, en la presente guía se establecen recomendaciones dentro del marco de la *Caracterización Energética y Diagnóstico del Desempeño Energético* y para el elemento de Monitoreo Medición y Análisis (Figura 1) con objeto de optimizar la eficiencia energética del sistema. Para el efecto, se toman y adaptan elementos fundamentales contenidos en estudios técnicos, principalmente en: (I) Estudio Integral de Sistemas de Bombeo de Agua Potable Municipal de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía del



Gobierno Federal Mexicano, 2011 y (II) del documento del BID: Evaluación de Sistemas de Bombeo de Agua. Manual de Eficiencia Energética, primera edición, 2011.

1.1 Optimización de demanda energética

Optimizar la demanda energética en sistemas para el tratamiento de aguas residuales (STAR) y/o en las sistemas de tratamiento de agua potable (STAP), incluyendo captación y distribución, permite reducir el consumo de energía manteniendo la misma efectividad del proceso e impactando en la reducción de los costos operativos. Adicionalmente, la optimización energética tiene una incidencia en la reducción de emisiones gases efecto invernadero.

El uso eficiente de energía no necesariamente implica que se deban implementar las últimas tecnologías (aunque es deseable) sino saber emplear y administrar los recursos energéticos disponibles de un modo eficiente y eficaz para desarrollar los respectivos procesos (UPME, 2007).

A continuación, en la Tabla 1 se muestran los elementos y características de los diferentes sistemas que tienen un alto impacto en el consumo energético de un sistema de tratamiento de agua.

Tabla 1. Elementos de un sistema de tratamiento de agua con mayores requerimientos energéticos

STAP	STAR
<p>Sistemas de bombeo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bombas sumergibles o turbinas de flecha para captación en pozos. • Bombas centrífugas horizontales o verticales, usadas en captación, conducción y rebombeo. • Bombas y compresores dosificadores de químicos. • Sopladores. • Sistemas para apagado de cal. 	<p>Aireación y mezcla.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bombas: flujo de efluentes y recirculación de lodos • Manejo de lodos: bombas para deshidratación, filtros prensa o banda • Sistemas anaerobios: Calentamiento para digestores. • Sistemas aerobios: aireación (1 kWh/kg DBO₅ removida). • Floculación y sistemas auxiliares: en caso que existan sistemas de bombeos internos.

Fuente: El Autor

En los STAR la aireación y mezcla es el componente que demanda un mayor consumo energético en una proporción cercana al 50% en comparación con los demás componentes del sistema, la cual se incrementa si contempla digestores aerobios.

En contraste, más del 60% de la demanda energética que tiene en una STAP está asociada al sistema de bombeo considerando que este contempla desde el punto de captación de agua hasta la entrega al usuario. Bajo este contexto, los principales elementos que influyen en el mayor consumo energético desde el punto de vista del diseño del sistema son:

- La distancia desde el punto de captación al sistema y del sistema al usuario.
- La topografía en la cual se ubica el sistema de captación, tratamiento y suministro.



- La demanda de los usuarios.

Por su parte, auditorías energéticas y operacionales efectuadas a diferentes empresas de acueducto, así como el análisis de los costos energéticos operacionales y no operacionales, permiten inferir que los costos asociados a otro tipo de equipos diferentes al bombeo tales como dosificadores de reactivos, equipos de laboratorio, neveras, aire acondicionado, luminarias y alumbrados entre otros, pueden tener consumos de energía altos que impactan los costos operacionales y por ende, es relevante considerar la evaluación de sus consumos para tomar decisiones que permitan optimizar sus consumos, si así se determina.

Estas auditorías además permitirán identificar malas prácticas como la sobre carga eléctrica, los consumos fantasmas por equipos en desuso conectados a la red, fugas asociadas a puntos ciegos o muertos, robo de energía por personal vecino a la planta, redundancia de luminarias y alumbrado e incumplimiento de los reglamentos técnicos sectoriales tanto de energía como de agua y saneamiento básico, entre otros.

Ahora bien, es necesario hacer énfasis en que las auditorias energéticas deben complementarse con una evaluación operacional que permita también identificar opciones de ahorro energético asociados a factores netamente operativos como por ejemplo la optimización en el lavado de filtros.

Por ende, una vez la planta se encuentra operando se pueden implementar metodologías integrales a través de un Sistema de Gestión Integral de Energía que acorde con estudios implementados por Watergy México, permiten obtener reducciones energéticas entre el 30 y 60%, con su respectiva repercusión en los costos operativos. La norma internacional ISO 50000 y los documentos generados por la UPME, son una guía para implementar el Sistema de Gestión Integral de Energía.

No obstante, este documento se centra en uno de los componentes que conforman dicho Sistema, el de implementación de medidas de planificación de eficiencia energética, las cuales hacen parte de la Gestión de la Energía en la empresa, que requiere un compromiso de la alta dirección y un levantamiento y análisis de la información recopilada.

Bajo este contexto, el documento establece medidas de eficiencia energética que pueden ser aplicadas tanto a STAP como a STAR, dado que se tienen elementos hidráulicos comunes y que el desarrollo de una evaluación energética independientemente del sistema requiere los mismos elementos: i) un balance de energía, previa identificación de pérdidas, ii) un balance hidráulico y iii) una optimización del sistema.

Dentro de las principales medidas de eficiencia energética a implementar en los diferentes sistemas de tratamiento y que se desarrollan en el presente documento, se encuentran:

- Reducir pérdidas en las instalaciones eléctricas.
- Optimizar el factor de potencia.
- Realizar mejoras en la eficiencia de motores y bombas y/o sustituirlos.
- Reducir pérdidas de carga en succión y descarga de sistemas de bombeo.
- Implementar mejoras en la operación, aprovechando la infraestructura existente.
- Reducir pérdidas mecánicas optimizando prácticas de mantenimiento.
- Optimizar los componentes hidráulicos:



- Reducción del flujo de agua al mínimo.
- Optimización del número de equipos de bombeo al mínimo.
- Reducción de la carga de bombeo y optimización de los esquemas de distribución.
- Reducir pérdidas en la captación, tratamiento y red de distribución.



2. Optimización energética

2.1 Identificación del cumplimiento de la reglamentación técnica de energía y agua y saneamiento básico

El sector de energía tiene dos reglamentos técnicos de obligatorio cumplimiento para cualquier instalación que son:

- El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE y
- El Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público – RETILAP

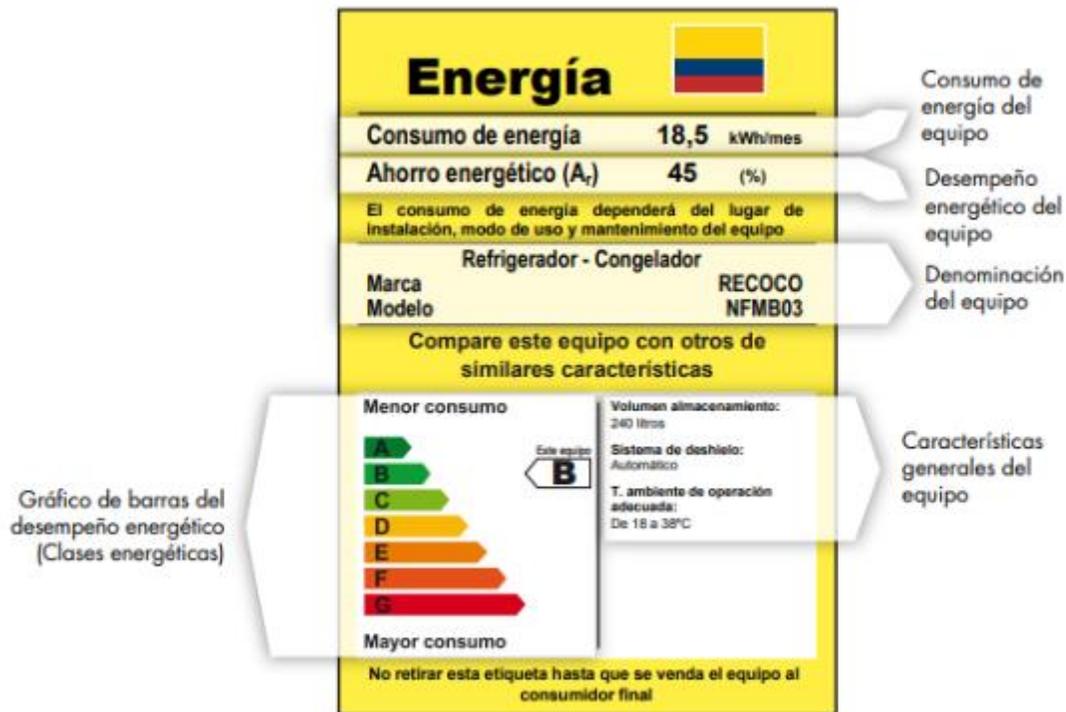
Es de especial atención, que en instalaciones de empresas de acueducto menores a 5.000 suscriptores, que no se cuente con los planos de la red eléctrica de baja y media tensión, iluminación e instrumentación de las plantas de tratamiento y edificios administrativos (tampoco es usual encontrar planos hidráulicos). El incumplimiento de esta reglamentación se evidenció en algunas de las auditorías efectuadas a estas empresas.

Es importante mencionar que, en el país existe un reglamento de etiquetado RETIQ, que entró en vigencia a partir del 31 de agosto de 2016 haciendo exigible el porte de etiquetas para algunos equipos eléctricos de refrigeración doméstica, acondicionadores de aire para recintos, motores monofásicos y trifásicos de inducción, balastos para iluminación fluorescente, entre otros. La etiqueta se convierte en una herramienta útil y válida, para que el consumidor de equipos de uso final de energía tome decisiones informadas, por lo cual se recomienda que en caso de hacer la adquisición de elementos eléctricos como los mencionados en el marco de la resolución, se consulten las etiquetas con objeto de tomar la mejor decisión de compra en pro de adquirir equipos con menor tecnología y de bajo consumo energético. En la Figura 3 se presenta la información que contienen las etiquetas.

“Un equipo más eficiente puede llegar a consumir la mitad de energía que uno convencional en un año”, Minenergía.



Figura 3. Información de la etiqueta



Fuente: Minminas. Cartilla de etiquetado

Por otro lado, el sector de agua potable y saneamiento básico expidió la actualización de su Reglamento Técnico Sectorial (RAS), adoptado por la Resolución 330 de 2017. En la misma, se incluye de manera integral a lo largo del documento los temas de energía, ya que se convierte en uno de los elementos que afecta directamente uno de los criterios orientadores de la reglamentación que es el de “Garantizar la seguridad, durabilidad, funcionamiento adecuado, calidad, eficiencia, sostenibilidad, y redundancia de la infraestructura requerida para la prestación de los servicios de agua y saneamiento básico” (art. 3).

2.2 Balance de masa y energía

El desarrollo de un balance de masas en el sistema de tratamiento permite identificar pérdidas de volúmenes de agua, para lo cual es necesario analizar la distribución de caudales de entrada y salida (ver Sección 4.1.1). Asimismo, se requiere optimizar la eficiencia electromecánica del sistema de bombeo, que se afecta por operación fuera del rango recomendado por fabricante, ajustar el sistema y equipos a condiciones reales, a fin de obtener una mayor continuidad de la operación.

En caso tal que en el balance se evidencien pérdidas volumétricas, la implementación de mecanismos de control de presiones como válvulas, reguladores de presión o variadores de frecuencia, o la verificación del adecuado funcionamiento de estos instrumentos, facilitará la identificación y reducción de dichas pérdidas.



En el Cuadro 5 de la Sección 4 se presenta el diagnóstico y recomendaciones para incrementar el ahorro energético en sistemas de tratamiento de agua asociado al componente hidráulico, y en la Sección 4.1 se incluyen elementos que pueden ser considerados al momento de planear una optimización de la operación, previo balance de masas del sistema.

Además del balance de masas, debe realizarse un análisis de las pérdidas en los sistemas típicos que consumen energía cuyo cálculo se presenta en esta sección, con el propósito de identificar cuáles son los elementos de mayor consumo de energía y en qué proporción. En general, la evaluación se realiza sobre los siguientes elementos, siendo los tres primeros los que generan mayor consumo.

- Suministro energético: incluyendo las características de la acometida (parcial es decir desde el tablero general hasta la caja de medidores, la acometida subterránea que implica tuberías y ductos, cajas de inspección, accesorios y otros) y del contrato de suministro energético.
- Sistema electromotriz, que comprende subestación eléctrica, transformadores y motor eléctrico.
- Conjunto motor-bomba, lo que incluye eficiencias, condiciones de operación y aspectos de mantenimiento.
- Sistemas de distribución, que contienen todos los elementos de las redes de distribución como interconexiones, conducciones, tanques de regulación y otros accesorios.

Este análisis permite cuantificar de forma desagregada todas las pérdidas energéticas, distinguiéndolas del trabajo útil².

2.2.1 Consumo de energía en los sistemas de bombeo

Este consumo está dado por la potencia demandada promedio durante las horas de operación y se calcula acorde con la Ecuación 1:

$$C_{eb} = \frac{P_e * t}{1000} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde,

- C_{eb} = Consumo de energía del equipo de bombeo (kWh).
- P_e = Potencia promedio usada durante el tiempo requerido por el Equipo (W).
- t = Tiempo de operación en horas al año (h/año).

El consumo de energía total del sistema de agua y saneamiento es función de las variables reflejadas en la Ecuación 2.

$$C_{et} = C_{eb} + C_{ec} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde

- C_{et} = Consumo de energía total del sistema, (kWh).
- C_{eb} = Consumo de energía en los sistemas de bombeo, (kWh).
- C_{ec} = Consumo en el resto de los componentes incluyendo la energía perdida de acuerdo al concepto del balance de energía descrito en la Figura 4 de la sección 2.2.2.1, (kWh).

² Es el trabajo máximo disponible. (Carrión E y Palou J, Termodinámica I)



2.2.2 Variables que afectan la demanda energética en los sistemas de bombeo

2.2.2.1 Potencia

La potencia requerida por los sistemas de bombeo se encuentra dada por la Ecuación 3.

$$Pe = \frac{Q \cdot H \cdot \rho}{\varepsilon} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde

- $Pe =$ Potencia requerida por el equipo de bombeo, (W).
- $Q =$ Gasto suministrado por el equipo - Cantidad de agua bombeada, (m³/s)
- $H =$ Carga total del equipo de bombeo, (m).
- $\rho =$ Peso específico del fluido a bombear, (N/m³). Para el agua es 9,81 N/m³.
- $\varepsilon =$ Eficiencia electromecánica del equipo de bombeo.

Bajo este contexto, en el Cuadro 1, se especifican las variables que intervienen en Q, H y ε

Cuadro 1. Variables que afectan la potencia

Variables que afectan la potencia (Pe)	
<p>Carga (H) Siendo H función de: $H = P_m + ND + h_{fr} + h_v$ Ecuación 4.</p> <p>H = Carga total de bombeo en metros de columna de agua (m.c.a).</p> <p>P_m = Presión en la descarga dada en m.c.a que refleja las pérdidas por fricción en las tuberías de descarga y la magnitud de la altura topográfica a donde se debe bombear el agua durante la operación.</p> <p>ND = Nivel dinámico, que refleja el nivel de succión desde donde el agua debe ser bombeada en m.</p> <p>h_{fr} = Pérdidas por fricción en la columna de succión.</p> <p>h_v = Carga de velocidad que refleja el efecto de la velocidad del agua en las tuberías, siendo h_v equivalente a la relación $\frac{v^2}{2g}$ en donde v es la velocidad.</p> <p>La H se afecta por:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ El tipo de fuentes en los que se realiza captación (superficial o subterránea) y la profundidad del punto de captación en el caso de ser una fuente subterránea, en otras palabras la profundidad de bombeo y la gravedad del abatimiento de acuífero. ✓ La calidad de mantenimiento del pozo. ✓ La densidad poblacional, especialmente en cotas altas. ✓ Las características de la red de distribución como mantenimiento, diseño, pérdidas de presión excesivas, contrapresiones, falta de instrumentación (v.g. reguladores de presión, válvulas), tanques, variadores de velocidad y la falta de sectorización en la red. 	<p>Cantidad de agua bombeada (Q) Variables que afectan Q:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Tamaño de la población y tipo de la población que demanda el recurso. ✓ Clima, bajo la premisa que dependiendo de este cambian los hábitos de consumo del recurso por parte de una población. ✓ Nivel de pérdidas de agua, las pérdidas afectan directamente el consumo energético. ✓ Número de horas de operación del bombeo. ✓ Eficiencia en la operación hidráulica y control de presiones. La distribución de caudales y presiones provocadas por la operación de válvulas, sujeto al crecimiento poblacional y ausencia de herramientas técnicas para la toma de decisiones al incorporar nuevos nodos a la red. ✓ Niveles de automatización y su implementación. La ausencia de sistemas, el control manual inadecuado de la operación y la subutilización de sistemas automatizados generan mayores demandas energéticas.



Variables que afectan la potencia (Pe)

Eficiencia electromecánica (ϵ) y las pérdidas de energía en la transformación energética

La determinación de pérdidas energéticas y eficiencia electromecánica requiere la identificación secuencial energética de los elementos en el proceso, los cuales se muestran en la Figura 4.

Figura 4. Esquema general, secuencia energética – Balance de energía



Fuente: CONUEE, 2011.

La energía que no se convierte en trabajo útil, representa pérdida de la misma y por ende gastos operativos.

Los principales factores que afectan las pérdidas en cada secuencia de la cadena mostrada en la Figura 1 son:

- ✓ Calidad de las instalaciones eléctricas, lo que genera bajo factor de potencia, pérdidas por sobrecalentamiento (efecto Joule), conductores y alimentadores subdimensionados, falsos contactos y sobrecapacidad de subestaciones.
- ✓ Niveles de eficiencia de los equipos de bombeo.
- ✓ Niveles de eficiencia de los motores asociados a los sistemas de bombeo (falta de uso de motores de alta eficiencia).

Fuente: Adaptado CONUEE, 2011.

2.2.3 Metodologías de evaluación – Cálculo de pérdidas

Para determinar el balance de energía del sistema se deben calcular las pérdidas en cada uno de los componentes acorde con lo expresado en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Identificación y cálculos de pérdidas energéticas en los componentes eléctricos del sistema



Cálculo de pérdidas

Pérdidas en el transformador

Son de 2 clases de pérdidas (i) en el núcleo que son independientes a la carga a la que es sometido, son invariables a tensión y frecuencia constantes, es un dato suministrado por operador y (ii) en el embobinado, las pérdidas están relacionadas directamente con el factor de potencia.

Se determina por:

$$\Sigma(\text{Pérdidas núcleo} + \text{Pérdida embobinado a plena carga}) * \text{Índice de carga}^2 \text{ Ecuación 5.}$$

$$\text{Índice de carga} = \text{potencia de carga} / \text{potencia a plena carga} \text{ Ecuación 6.}$$

Temperatura de operación

La ineficiente remoción de calor (altas temperaturas de operación por mal funcionamiento del sistema de enfriamiento) incrementa las pérdidas.

Se determinan por:

Tablas generales proporcionadas por fabricante.

Factor de potencia (FP)

Puede incrementar pérdidas por:

1. Efecto Joule, son función del cuadrado de la corriente, se manifiesta en los:
 - Conductores entre el medidor y el usuario.
 - Embobinados de los transformadores de distribución.
 - Dispositivos de operación y protección
2. Aumento en la caída de voltaje, lo que incrementa la potencia aparente, reduciendo la capacidad de carga instalada.

El FP en motores de inducción depende de su capacidad (HP) y del factor de carga (FC) al cual se esté trabajando.

En el diagnóstico debe determinarse si el FP del motor está por debajo del que correspondería dado el número de polos, su capacidad nominal y el factor de carga (FC), de ser así el motor está funcionando incorrectamente y debe ser reparado o cambiado.

Debe observarse si en el sistema hay un sistema para compensar el FP y su localización.

En el sistema eléctrico incluye, entre otras:
* Red eléctrica,
* Transformadores,
* factor de potencia y
* conductores eléctricos

Motores

Se debe evaluar separadamente el motor de la bomba. El motor de inducción es el más común por ser versátil y de bajo costo, muy utilizado en bombeo centrífugo y para el bombeo de agua en STAP.

Se determina por:

La eficiencia del motor a través del método de la curva del motor, procedimiento basado en la comparación de Eficiencia calculada vs. Eficiencia reportada por curvas de eficiencia en función de la carga para el motor y se explica como sigue:

1. A partir de las características nominales del motor (HP, RPM y V), se identifica la curva de eficiencia del motor (gráfica % eficiencia vs. % carga). La eficiencia se calcula acorde con la siguiente relación:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{potencia mecánica}}{\text{potencia eléctrica}} * 100 \text{ Ecuación 7.}$$

Genéricamente se ha establecido que la máxima eficiencia del motor 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.

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



Cálculo de pérdidas

$$FC = \frac{Pe/n_m}{HP_{nom} \cdot 0.746} \text{ Ecuación 8.}$$

Donde:

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

Pe = potencia eléctrica demandada por el motor, obtenida en mediciones de campo (kW).

η_m = eficiencia de operación del motor (-).

HP_{nom} = potencia nominal del motor, obtenida en mediciones de campo (HP).

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.

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, o si se conoce la temperatura a la que se expuso el motor durante el proceso de rebobinado, deberá depreciarse conforme lo expresado a continuación:

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

Conductores eléctricos

El sistema electromotriz está compuesto por:

Conductores, transformadores de control, protecciones, arrancadores, controladores y motores.

El elemento crítico son los conductores que generan la resistencia.

Las pérdidas en este elemento se calculan dependiendo del tipo y calibre de la resistencia, ver tablas del fabricante

Bombas³

Identificar: (i) Eficiencia actual del equipo, (ii) condiciones de operación y (iii) características de las instalaciones y pérdidas energéticas en el sistema de conducción.

Pérdidas internas originadas por:

- Carga: resultan de la viscosidad y turbulencia del fluido.
- Fugas internas entre partes móviles y fijas.
- Rozamiento interno.

Pérdidas externas originadas por:

- Rozamiento externo entre empaques, ejes y cojinetes.
- Puntos entre el eje y la carcasa.

³ BID, 2011. Evaluación para sistemas de bombeo de agua. Manual de eficiencia energética Primera edición



Cálculo de pérdidas					
	<p>Ecuación 9. $\eta_b = P_s/P_m$</p> <p>Donde η_b = Eficiencia global bomba P_s = Potencia manométrica a la salida (HP) P_{motor} = Potencia externa que corresponde a la potencia mecánica absorbida (HP)</p>	<p>Ecuación 10. $P_s = Q * \rho * g * H_t / 746$</p> <p>Donde P_s = Potencia manométrica Q = flujo volumétrico (m³/s) ρ = densidad del agua bombeada (kg/m³) g = aceleración de la gravedad (m/s²) H_t = carga total de bombeo (m.c.a)</p>	<p>Ecuación 11. $H_t = (P_d - P_s) * 10.3$</p> <p>Donde H_t = carga total de bombeo (m.c.a) P_d = presión de descarga media (kg/cm²) P_s = presión de succión media (kg/cm²)</p>		
	<p>En caso de los pozos profundos o sistemas de bombeo, donde no se puede medir la presión de succión se podrán considerar las Ecuaciones 12-15.</p>	<p>Ecuación 12. $H_t = (P_d * 10.3) + N_s + D_{r-m} + h_v + h_{fs}$</p> <p>Donde H_t = carga total de bombeo (m.c.a) 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).</p>	<p>Ecuación 13. $h_v = v^2 / (2g)$</p> <p>Donde h_v = carga de velocidad (mca). v = velocidad del fluido (m/s). g = aceleración de la gravedad (m²/s).</p>	<p>Ecuación 14. $V = Q/A$</p> <p>Donde v = velocidad del fluido (m/s). Q = caudal medido en campo (m³/s). A = área de la sección transversal de la tubería (m²).</p>	<p>Ecuación 15. $A = \pi \Phi^2 / 4$</p> <p>Donde A = área de la sección transversal de la tubería (m²). Φ = diámetro de la tubería (m).</p>
Eficiencia electromecánica (η_{em})	<p>Corresponde a la eficiencia del conjunto motor-bomba. Debido a la dificultad de medir la potencia mecánica por separado.</p> <p>Donde η_{em} = Eficiencia electromecánica P_h = es la potencia manométrica en kW P_e = la potencia eléctrica en kW.</p> <p>Así:</p> <p>Donde η_m equivale a la eficiencia del motor en %.</p> <p>La comparación de η_{em} con η_b y η_m debe ser cercana a los valores recomendados por la norma⁴ para estos equipos. De ser valores distantes, debe considerarse un mantenimiento correctivo o sustitución de equipos.</p>	<p>Ecuación 16. $\eta_{em} = P_h / P_e$</p>	<p>Ecuación 17. $\eta_{em} \approx \eta_b + \eta_m$</p>		
De carga en tuberías de succión y descarga, y en la red de distribución	<p>Deben evaluarse las características de las instalaciones y de la red, considerando:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Condiciones de succión. Verificar que se den las condiciones para garantizar la carga neta positiva de succión (NPSH). • Sistemas de conducción. Baja capacidad en sistemas de conducción se evidencian en: 				

⁴ IEC 60034-30:2008, IEC 60034-2-1: 2007 IEEE 112:2004 and EPAAct'92. Ahora bien, el artículo 4 de la resolución 40094 de 2020 señala que "el Ministerio de Minas y Energía estudiará las tendencias regulatorias internacionales con el fin de dar trámite a una propuesta que incluya dentro del alcance del RETIQ los equipos de bombeo y su desempeño energético como conjunto bomba-motor" Una vez se expida esta norma entre 2021 y 2022, se deberá atender los parámetros por esta señalados.



Cálculo de pérdidas

	<ol style="list-style-type: none"> 1. Problemas de contrapresión opuesta al flujo desde una fuente o equipo de rebombeo. Sucede cuando se unen caudales de fuentes descargadas a diferentes presiones. 2. Reducción de la capacidad de producción de los trenes de bombeo, especialmente cuando se tienen trenes en paralelo, pues cuando se agregan trenes con objeto de entregar un mayor caudal no se revisa la capacidad de conducción. Escasa capacidad de los sistemas de conducción existentes. Se origina cuando las pérdidas por fricción son significativas. Para evaluar esto se debe considerar: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Los datos de campo de medición e inspección, evaluar la velocidad del fluido en las tuberías primarias de conducción a la descarga de pozos y sistemas de rebombeo. ▪ En tuberías de conducción donde se tengan velocidades del fluido por encima de los 2 m/s, evaluar las pérdidas energéticas por este concepto. ▪ Las pérdidas por fricción en una tubería se calculan acorde con la siguiente ecuación: $hf = f * (L/D) * (v^2/2 * g) \quad \text{Ecuación 18.}$ <p>Donde hf = 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/s²).</p> <p>El f se puede calcular por medio de la ecuación Colebrooke-White a partir del número de Reynolds (función de la velocidad del fluido, diámetro de la tubería, viscosidad dinámica y densidad) y de la rugosidad relativa (propia del material). El factor de fricción o coeficiente de fricción, posteriormente se itera la fórmula de Coolebrook utilizando el diagrama de Moody, que integra el valor de f para todos los tipos de flujos. En este diagrama se entra con el valor de la rugosidad relativa y el valor del número de Reynolds, para cada una de las tuberías de succión y descarga.</p> 3. Cálculo de las pérdidas secundarias en los accesorios. 4. Una vez calculadas las pérdidas totales por fricción, se procede a calcular la potencia eléctrica necesaria para compensar las pérdidas de carga por fricción, acorde con la siguiente ecuación: $P_e = hfr * Q * 9.81 / \eta_{em} \quad \text{Ecuación 19.}$ <p>Donde P_e = potencia eléctrica necesaria para compensar pérdidas (kW). hfr = pérdidas de carga por fricción (m.c.a). Q = caudal manejado (l/s). η_{em} = eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba (-).</p>
<p>Otros aspectos a revisar</p>	<p>Aspectos que, aunque no se cuantifican directamente generan pérdidas, si se encuentran en mal estado:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vibración de cojinetes. • Temperatura de conexiones eléctricas. • Resistencia del aislamiento de la bobina de un motor.

Fuente: Adaptación BID, 2011 y CONUEE, 2011

Adicionalmente a la identificación y cálculo de pérdidas energéticas a cada uno de los componentes eléctricos presentados en el Cuadro 2 deben identificarse y evaluarse los siguientes factores que traen como consecuencia



una baja eficiencia del bombeo y que según los resultados de auditorías energéticas pueden impactar hasta el 40% de los ingresos del sistema.

- Dotaciones altas debido al alto porcentaje de fugas o al robo y desperdicio de los consumidores.
- Inadecuados esquemas de operación del sistema, falta de control de presiones y fugas en las redes de distribución.
- Infraestructura subutilizada.
- Ausencia de mantenimientos preventivos en los equipos.
- Suministro discontinuo del servicio.
- Desconocimiento del equipo y normas.
- Operación empírica del sistema.
- Falta de capacitación técnica del personal.



3. Indicadores energéticos

3.1 Índice de consumo energético (IE)

Indicador que permite relacionar el consumo de energía con los volúmenes de agua, representa la relación entre la energía utilizada por un sistema de bombeo de agua potable para producir y distribuir el agua a la población y/o el tratamiento del agua servida, según sea el caso.

Se calcula acorde con la Ecuación 20.

$$IE \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Energía total consumida por todos los equipos del sistema} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right)}{\text{Volumen total de agua generado o tratado} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right)} \quad \text{Ecuación 20.}$$

La energía total consumida puede determinarse a partir del historial de consumos energéticos registrados en la factura del servicio de energía, durante el periodo de tiempo dado, considerando que no más del 5% del valor facturado fue causado por los servicios administrativos, si el sistema posee datos específicos referentes a este consumo promedio pueden descontarse del valor de energía total.

3.2 Trabajo de bombeo (TB)

El trabajo de bombeo permite caracterizar energéticamente un sistema de bombeo, y se define como una función de la cantidad de agua bombeada (Q) y la carga dinámica (H), acorde con la Ecuación 21.

$$TB = Q * H \quad \text{Ecuación 21.}$$

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

Representa el costo específico por unidad de energía consumida, el cual depende del 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 acorde con la Ecuación 22.

$$CUE = \text{Importe de facturación eléctrica anual} (\$/\text{año}) / \text{Energía total consumida} (\text{kWh}/\text{año}) \quad \text{Ecuación 22.}$$



4. Medidas para el ahorro y eficiencia energética

Las medidas para el ahorro y eficiencia energética se pueden clasificar en tres grandes grupos (Figura 5), para los cuales procederemos a dar algunas recomendaciones generales que podrían ser consideradas por los responsables de la Gestión Integral de Energía del sistema.

Figura 5. Tipificación de las medidas para ahorro energético



En el Cuadro 3 se presentan una serie de medidas de ahorro energético, previo diagnóstico de los factores que intervienen en los transformadores, motores y otras pérdidas energéticas en sistemas de tratamiento de agua.

Cuadro 3. Diagnóstico y recomendaciones para incrementar el ahorro energético en sistemas de tratamiento de agua – Componente eléctrico

Medidas de Ahorro Energético		
Parámetro	Diagnóstico	Recomendación
1. Reducción de Pérdidas en las Instalaciones Eléctricas		
Reducción de Puntos Calientes	Es usual ver que los cables que se transportan por la tubería conduit sean superiores a los parámetros establecidos por el RETIE, generando puntos calientes (fugas de energía) e incrementan los riesgos de cortos circuitos con consecuencias que pueden ser tanto menores como graves, como el daño de equipos críticos o la inoperancia temporal de la planta (dependiendo del daño).	Cumplimiento del RETIE.
Mantenimiento redes	Permanencia de cables, equipos e instrumentos inutilizados, inservibles o que corresponden a acometidas ilegales por vecinos externos a la planta. Estos generan	Cumplimiento del RETIE. Limpieza de redes.



Medidas de Ahorro Energético		
Parámetro	Diagnóstico	Recomendación
	consumos fantasmas de energía o consumos stand by ⁵ .	
Mantenimiento luminarias y equipos electrógenos	A los equipos electrógenos instalados no se les hace mantenimiento, por lo cual, operan en condiciones poco óptimas, incumpliendo con el RETIE y RETILAP.	Cumplimiento del RETIE y RETILAP. Limpieza y mantenimiento.
Los transformadores. Si las temperaturas del transformador (Tt) están fuera del rango se ocasionan pérdidas	La Tt es alta debido a la temperatura ambiente.	Instalar sistema de ventilación forzada al transformador.
	La Tt es alta debido a falta de ventilación en el cuarto instalado.	Mejorar la ventilación del cuarto.
	La Tt es alta sin motivos externos al equipo.	Realizar mantenimiento, si el daño continúa evaluar si es necesario cambiar el transformador considerando recomendaciones de fabricante y el tiempo de operación.
	La Figura 6 contigua muestra la relación de las pérdidas en los transformadores en función de la temperatura. (Fuente: BID, 2011)	<p style="text-align: center;">Incremento de las pérdidas (porcentaje)</p> <p style="text-align: center;">Temperatura (°C)</p> <p style="text-align: center;">Figura 6. Pérdidas de transformadores vs. Temperatura</p>
Calibre de los conductores	Si se determina que el calibre de los conductores no es del calibre que requiere del equipo de bombeo.	Cambiar el equipo conductor acorde con los requerimientos para el sistema de bombeo.
Optimizar el factor de potencia (FP)	Si el FP es bajo debido a motores sobredimensionados o en malas condiciones.	Sustituir los motores problema, previa consideración del tiempo de operación, por unos de alta eficiencia que operen al 75% de carga o más.
	Si los motores funcionan bien o son nuevos, incrementar el FP.	Instalar un banco de capacitadores, con una capacidad tal para elevar el FP a niveles superiores al 90%.
2. Incrementar la Eficiencia de Motores		
Corregir los desbalances del voltaje (D_{BV}) en la alimentación eléctrica del motor	Desbalance de origen en la alimentación de la compañía eléctrica.	Solicitar a la compañía corrección del problema.
	Desbalance en la corriente demandada por el motor.	Realizar mantenimiento, si el daño continúa o si el desbalance es superior al 5% se debe evaluar si es necesario cambiar el motor considerando recomendaciones de fabricante y el tiempo de operación.
	Desbalance originado por el transformador de la subestación propia.	Realizar mantenimiento, si el daño continúa evaluar si es necesario cambiar el transformador considerando recomendaciones de fabricante y el tiempo de operación.

⁵ Es el consumo de electricidad de los aparatos electrónicos conectados permanentemente a la red.



Medidas de Ahorro Energético		
Parámetro	Diagnóstico	Recomendación
	Desbalance originado por un desbalance en las cargas del transformador.	Balancear las cargas del transformador.
	Si el voltaje en los bornes del secundario del transformador esta balanceado PERO hay un desbalance en la alimentación del motor.	Revisar el polo a tierra del transformador, y el motor. Revisar las conexiones CCM, arrancador y motor.
	El desbalance de voltaje se calcula a partir de las mediciones de tensión entre fases (ver Anexo I), por medio de la siguiente ecuación: $D_{BV} = \max((\max(V_{A-B}, V_{B-C}, V_{C-A}) - V_{prom}), (V_{prom} - \min(V_{A-B}, V_{B-C}, V_{C-A})))$ Ecuación 23. 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_{prom} = tensión promedio entre fases (V)	
Optimización de la eficiencia del motor eléctrico⁶	Voltaje de alimentación en el punto de acometida está por debajo del nominal.	Corregir con los TAPs o cambiadores del transformador. Si esto no funciona solicitar a la empresa de energía que corrija el problema.
	Voltaje de alimentación en el punto de acometida presenta variaciones superiores al 5%.	
	La velocidad de operación del motor está por debajo de la velocidad a plena carga.	Se deben lubricar o sustituir rodamientos y/o cojinetes.
	Alta temperatura y/o vibración en cojinetes y/o rodamientos.	
	El motor es de eficiencia estándar y tiene más de 10 años de operación y está presentando baja eficiencia.	Sustituir el motor por uno nuevo de alta eficiencia, que opere cerca del 75% de su capacidad.
3. Equipos de protección		
Subestaciones eléctricas	Ausencia de una subestación eléctrica.	Es importante que en este mismo marco las plantas cuenten con subestaciones eléctricas, que son un sistema de protección de la acometida eléctrica a la planta, no obstante, no es suficiente con contar con la misma si no se localizan en cuartos con suficiente ventilación o parcialmente expuestas a condiciones ambientales adversas.
Sistemas de tierra (polos a tierra)	Inexistencia de estos sistemas o instalación temporal (muchos de ellos instalados por proveedores de equipos) que no presentan la adecuada cobertura para toda la planta. En donde existen, varios sistemas a tierra, éstos no se interconectan, como lo obliga el RETIE.	Cumplimiento del RETIE. Instalación permanente de polos a tierra, acorde a las necesidades de la planta.

⁶ Según CONUEE una reducción del 30% en las pérdidas de un motor de 10HP con 82% de eficiencia incrementa su valor a un 87%, lo cual puede representar un beneficio significativo en el consumo energético



Medidas de Ahorro Energético		
Parámetro	Diagnóstico	Recomendación
4. Luminarias		
Sectorización	Es común encontrar que la iluminación de las plantas no se encuentra sectorizadas, por ende, se encuentran interruptores únicos para varias áreas.	Sectorización de la iluminación por áreas.
Redundancia	Es común encontrar duplicidad de reflectores y luminarias en un mismo punto. Esto debido a dos factores: (1) selección inadecuada de la potencia del bombillo a requerir, y (2) desinstalación de equipo inservible o de baja capacidad.	Limpieza (retiro de equipo inservible) y mantenimiento de luminarias y reflectores.
Selección inadecuada de luminaria	Es común observar selección inadecuada de luminarias, especialmente aquellas que están sobre un espejo de agua, pues la misma dificulta, especialmente en la noche la evaluación visual, como resultado tienden a instalarse varias opciones en el tiempo de diferente potencia con resultados similares.	Instalación de luminarias sumergibles en las zonas de filtros y tanques, que tienen un menor consumo energético y permiten ver realmente las condiciones del agua y el floc.

Fuente: Adaptado CONUEE, 2011 y BID, 2011 y hallazgos de auditorías eléctricas y operativas 2017.

Una medida adicional de ahorro energético está asociada a la adecuación del equipo de bombeo al punto de operación real.

Acorde con BID (BID, 2011) se deben definir dos puntos de operación carga-gasto, como mínimo, donde opere el equipo de bombeo. Posteriormente, se analizan las características del equipo instalado y se evalúa si es recomendable una adecuación del mismo a las condiciones de operación reales (v.g. reducción del número de tazones, recorte de impulsores, cambio de impulsores, o sustitución del equipo de bombeo). Toda modificación puede generar cambios de diseño, por ello esto se debe realizar de común acuerdo con el fabricante.

En el Cuadro 4 se indican algunas acciones que pueden efectuarse para incrementar la eficiencia de la bomba, según el tipo de problemática.

Cuadro 4. Acciones que permiten mejorar la eficiencia de las bombas.

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.

Fuente: BID, 2011



Otras medidas de ahorro que deben considerarse están directamente relacionadas con la eficiencia en la operación hidráulica, e incluyen la reducción en pérdidas de carga, fugas (Cuadro 5) y en optimización de la operación.

Cuadro 5. Diagnóstico y recomendaciones para incrementar el ahorro energético en sistemas de tratamiento de agua – Componente hidráulico

Parámetro	Diagnóstico	Recomendación
Corrección de defectos en la configuración de tuberías de descarga y en la operación	Aplica para los sistemas que durante el balance energético hayan mostrado problemas en la configuración de su tubería de descarga que esté ocasionando un bajo rendimiento energético de alguno o todos los equipos involucrados.	Modificación de los trenes de descarga o la configuración de las conducciones primarias
Reducción de pérdidas por cortante en conducciones Disminuye el impacto energético de las conducciones con altas velocidades, que en algunos casos pueden alcanzar el 30% de la potencia demandada.	La velocidad del agua dentro de la tubería es superior a 2 m/s.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Si la tubería ya tiene varios años en operación y se encuentra en mal estado, sustituirla por una de mayor diámetro, con la que se logren velocidades del agua entre 1 y 1,5 m/s. 2. Si la tubería se encuentra en buen estado, analizar las siguientes opciones: <ul style="list-style-type: none"> • Instalar una tubería en paralelo a la actual, de un diámetro tal que se reduzca la velocidad del agua a un valor entre 1 y 1,5 m/s. • Sustituir la tubería actual por una de mayor diámetro, con la que se logren velocidades del agua entre 1 y 1,5 m/s.
Reducción de fugas	Presencia de fugas en el sistema hidráulico de la red de captación, sistema o red de distribución.	<p>Diseñar un programa de control de fugas permanente y continuo, debido a que las pérdidas en los sistemas de conducción de agua potable y aguas residuales ocasionan un gran consumo de energía en los sistemas de bombeo, para ello se debe:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar balances de masa en cada uno de los tramos de la red y sistema. 2. Recopilar registros de operación en el sistema y quejas de usuarios de la red. 3. Diseñar procedimientos de recepción, análisis, canalización y seguimiento de los reportes de fugas. 4. Determinar las causas de las pérdidas e identificar los recursos (humanos, logísticos, técnicos) para solucionar el problema. 5. Realizar planes de mantenimiento correctivos y preventivos a la red, incluyendo una evaluación sistemática de las válvulas. Planes que deben incluir planeación de recursos para su ejecución (personal, logísticos, técnicos, planes de monitoreo, económicos, insumos, etc.)

Fuente: Adaptado CONUEE, 2011 y BID, 2011.

4.1 Optimización de la Operación

Previa evaluación de la eficiencia hidráulica del sistema se podrán implementar:



- Sistemas de monitoreo que permitan registrar las variables hidráulicas de presión y caudal para identificar los índices de eficiencia y producción.
- *Variadores de frecuencia - VFT⁷* (sistema de control de presión y caudal por medio de un variador de frecuencia electrónico adaptado al motor eléctrico). Aplica para sistemas con suministros directos en donde la demanda de agua es variable. Los ahorros pueden ser significativos, reducen la energía requerida en el bombeo hasta en un 50%, son sistemas confiables, fáciles de operar, permiten aumentar el grado de control del flujo, reducen el estrés térmico y mecánico en los motores y correas durante el arranque y reducen el ruido de la bomba, acciones que tienen un impacto en la reducción de los costos de mantenimiento del sistema motor-bomba.

El uso de esta tecnología de transmisión es permitido y especificado en la normatividad nacional, siempre y cuando estén sujetos al cumplimiento de estándares internacionales o a guías de uso y aplicación de entidades como CIGRE, IEEE, IEC o similares.

- Tanques de regulación, reducen la capacidad del sistema de bombeo y por ende su potencia eléctrica, aplica para sistemas en los que el suministro de agua se efectúa directo a la red con una potencia acorde con el gasto máximo horario. Adicionalmente, el uso de estos tanques y la implementación de esquemas de sectorización, permiten optimizar la potencia de bombeo.
- Evaluaciones para la identificación de puntos que permitan el aprovechamiento de autogeneración de energía eléctrica en los diferentes procesos como el uso de sistemas fotovoltaicos, la implementación de turbinas en tubos madres o el aprovechamiento del biogás en sistemas de tratamiento de aguas residuales, entre otros.
- Planes de inversión que permitan la optimización del sistema de automatización y control para mejorar (I) la calidad de registro de datos, (II) identificar fallas en el sistema y (III) tomar decisiones de optimización.
- Programas de recambio tecnológico del sistema de bombeo, si aplica, según las condiciones de los equipos, el tiempo de operación y plan de inversiones del sistema.
- Implementar o mejorar los planes de mantenimiento, basados en la condición de los activos, apoyándose en técnicas predictivas para diagnosticar su condición y también planes de mantenimiento basados en la eficiencia energética, para el sistema para lo cual debe considerarse, entre otros, la trazabilidad de los equipos, los tiempos de garantía y las recomendaciones de fabricante, esto involucra identificar equipos críticos, identificar y seguir las recomendaciones de fabricante. De existir planes de mantenimiento, evaluar los registros de los mismos, las frecuencias ejecutadas para su aplicación, y si estas fueron insuficientes rediseñar el plan. El objetivo es fortalecer el mantenimiento preventivo y reducir los mantenimientos correctivos.

4.1.1 Reducción de pérdidas de agua en la red

Un adecuado plan de optimización y gestión de un sistema de tratamiento de agua involucra un diagnóstico de la operación, siendo preciso hacer el balance hídrico con especial atención en la red de distribución. Este balance

⁷ Variable Frequency Transformers



puede mostrar **pérdidas de agua en la red**, calculadas por **la diferencia entre el volumen total suministrado a través del sistema de distribución y el volumen registrado** (Vela, 1994).

Las pérdidas pueden originarse debido a **fallas físicas** del sistema de distribución (averías, pérdidas de la hermeticidad, daños en los equipos y sensores, exceso de agua consumida en operaciones de mantenimiento de la red, entre otros) y a **fallas en el proceso de medición y facturación**, que se asocian al agua que no es registrada por los micromedidores y procesos de facturación inadecuados, elementos que son explicados en el Cuadro 6.

Los errores en la medición y facturación conllevan a errores en la estimación de los consumos no medidos, de esta forma favorecen el uso clandestino de agua y en consecuencia promueven el consumo desmedido y desperdicio del recurso.

Indicadores hidráulicos

Establecer planes de gestión energética involucra que en los procesos de planificación de la operación se establezcan planes de mejora continua que permitan la implementación de programas de reducción de pérdidas, para evaluar el cumplimiento de metas, el índice de pérdidas se convierte en un excelente indicador, ver Ecuación 24 (Carporali).

$$IP = \frac{Vd - (Vm + Ve)}{Vd} * 100 \text{ Ecuación 24.}$$

En donde:

IP = Índice de pérdidas (%)

Vd = Volumen de agua estimado o medido que ingresa al sistema de distribución (m^3)

Vm = Volumen de agua micromedido (m^3)

Ve = Volumen de agua estimado para efectos de facturación (m^3)

Un segundo indicador que puede implementarse es el de rendimiento volumétrico (Rv), definido por la Ecuación 25, en donde valores por encima de 15% se consideran aceptables (Vela, 1994).

$$Rv = \frac{Vreg}{Vtotal} \text{ Ecuación 25.}$$

En dónde:

$Vreg$ = volumen registrado

$Vtotal$ = volumen total aportado en un mismo periodo de referencia.

De igual forma, acorde con Vela, 1994 la elaboración de gráficos de seguimiento y control de evaluación de volumen de pérdidas considerando diferentes elementos de evaluación son apropiados dentro del marco del programa de pérdidas, bajo este marco los indicadores que mayor información pueden aportar son:

- *Volúmenes de pérdida/ km de tubería/ tiempo*, siendo aceptable pérdidas de 0,2 L/s/km que equivale a 17 m^3 /km/día.



- Si se desea considerar la sección de las tuberías (diámetro interior), el indicador más apropiado considera el *volumen de pérdidas/longitud de la tubería/diámetro interior/día*, siendo valores aceptables para diámetros entre 60-150 mm 0,2-0,3 m³/km/mm/día.
- Se puede evaluar el caudal unitario perdido en relación al número de acometidas en una zona o tramo, acorde con *L/acometida/hora*, con rangos aceptables entre 3-10 L/acometida/hora, dependiendo de la distancia entre acometidas y el estado de conservación del tramo.

Otros indicadores, según Vela.

- Pérdidas económicas (\$)/km/año
- Pérdidas económica (\$)/m³ que es suministrado
- Gastos de inversión en reducción de pérdidas (\$) /km/año
- Gastos de inversión en reducción de pérdidas (\$) / m³ que es suministrado
- Porcentaje de pérdidas por sectores de la red.
- No de reparaciones/km/año
- No. de fugas detectadas/año

El programa de reducción de pérdidas debe considerar el volumen no registrado que equivale a las pérdidas de la red, considerando las causas que impiden su no contabilización, para empezar a implementar soluciones (Cuadro 6), iniciando por las que no requieren altas inversiones.

Cuadro 6. Identificación de pérdidas de agua

Causa	Afectación	Seguimiento y cuantificación
Ausencia de contador en el punto de consumo.	Incentiva el desperdicio de agua.	Instalación de contadores, incluso si no van a ser facturados.
Avería y error en contadores	Este volumen está por encima del 15% del volumen registrado.	Programas de seguimiento. Implementarse sistemas de telemedida de los contadores.
Volumen consumido en usos públicos (limpieza de calles, incendios, purgas, etc).	Este volumen está por encima del 10% del volumen registrado.	Debe registrarse o cuantificar los volúmenes consumidos por inferencia del número de horas de consumo, o por medidas periódicas del caudal.
Otro volumen no registrado.	Este volumen está por encima del 50% del volumen registrado. Este volumen corresponde a pérdidas por: <ul style="list-style-type: none"> • Fragmentación o rotura de los elementos del sistema. • La vida útil de algunos tramos de la tubería y accesorios llegó a su fin y no han sido reemplazados. • Evaporación en puntos de almacenamiento. • Defectos del sistema (fugas). • Conexiones ilegales. • Fallas en los elementos del sistema hidráulico (Presiones y velocidades inadecuadas, cavitaciones, vibraciones, interrupciones de suministro, parámetros de calidad por fuera 	Se cuantifica indirectamente a través de las diferencias entre el volumen que ingresa y los volúmenes micromedidos y estimados.



Causa	Afectación	Seguimiento y cuantificación
	de los rangos aceptables, especialmente turbiedad). Se ha demostrado que un 25% de los fallos producen pérdidas superiores al 70% del volumen total de fugas.	

Fuente: Adaptado Vela, 1994

Considerando los anteriores elementos que incrementan las pérdidas en la red, es necesario mantener un estricto registro de información que permita al operador evaluar tendencias en los datos y hacer seguimiento de indicadores, estos datos deben ser recopilados a partir de históricos en las instalaciones del sistema de tratamiento como en campo, a través de campañas de medición que deben enfocarse en el registro de la siguiente información (Semarnat, 2012):

- Levantamiento de cajas de válvulas y registros.
- Levantamientos topográficos.
- Medición de presiones en la red.
- Medición de caudales suministrados.
- Medición de la variación de la demanda de agua en la red.
- Identificación de la incertidumbre en la medición de cada equipo, y trazabilidad de las calibraciones en los equipos que hubiere lugar.
- Medición de errores de exactitud de micromedidores.
- Muestreo de ocurrencia de fugas.
- Inspección a puntos de conexión y medición de usuarios.

Medidas a adoptar dentro del programa de reducción de pérdidas

- Diagnóstico del sistema y red de distribución.
- Zonificación y sectorización de la red, jerarquizar los sectores acorde con la eficiencia.
- Replanteamiento del mantenimiento preventivo y correctivo del sistema de captación, tratamiento y distribución, implementando dispositivos de protección e incluyendo una programación de rehabilitación y sustitución de elementos hidráulicos y de medición.
- Implementación de válvulas reguladoras de presión y válvulas automáticas de seguridad.
- Homogenización de presiones.
- Reducción de presiones de inyección.
- Implementación y sistematización de modelos hidráulicos y matemáticos.
- Instauración de macro y micromedidores acorde con las necesidades que hayan surgido del diagnóstico inicial.

El Gobierno Federal Mexicano a través de la Comisión Nacional de Agua, generó en 2012 un documento titulado *“Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable”* de carácter público y gratuito que puede ser de interés para los operadores, es importante resaltar que la aplicación de uno o más de los lineamientos allí citados deben ser evaluados previamente acorde con el contexto propio de cada sistema de tratamiento.



4.2 Incorporación de otras fuentes de suministro de energía

El costo energético es uno de los factores que puede tener un mayor impacto en los costos operacionales de las sistemas, por ende para sistemas pequeñas o en zonas no interconectadas implementar proyectos que permitan suministrar energía a través de métodos alternativos podría ser una opción viable. Se puede evaluar la posibilidad de contar con fuentes no convencionales de energía renovable (Ley 1715 de 2014) como la eólica, la solar, también fuentes convencionales de energía como la diésel o soluciones híbridas que combinen fuentes locales de generación eléctrica con fuentes diésel.

En los sistemas de tratamiento de agua potable hay un buen número de sistemas y subsistemas que pueden utilizar estas fuentes no convencionales de energía renovable , 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.

Se debe tener en cuenta que todos los paneles solares fotovoltaicos o sistemas híbridos para uso en instalaciones eléctricas de construcciones residenciales (incluye soluciones individuales), comerciales o de uso público, deben dar cumplimiento a los requisitos establecidos en RETIE y demostrarlo mediante un Certificado de Conformidad de Producto.

4.3 Medidas de eficiencia energética en sistemas de tratamiento de agua residual

Acorde a lo especificado en la Tabla 1, el bombeo en aguas residuales es el segundo elemento de mayor consumo de energía en el sistema, después del sistema de aireación por ende se procederá a especificar las medidas de eficiencia energética para estos elementos.

4.3.1 Medidas relacionadas a los sistemas de aireación

Los equipos de aireación (aireadores superficiales o sumergidos, sopladores y turbocompresores), por su potencia y uso, representan el mayor consumo de la instalación (Castell, 2011).

Dentro de las variables que tienen una mayor influencia en el consumo eléctrico de los aireadores se encuentra la presión ejercida por la lámina de agua (10 kPa/m.c.a aproximadamente) o las pérdidas de carga de la red de difusores (30-50 cm.c.a), mantenimiento del sistema (fugas, difusores rotos, taponamiento, entre otras) y variables propias a la demanda de oxígeno del proceso biológico (Castell, 2011).

En la evaluación de eficiencia energética del sistema, se recomienda medir las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) en los sistemas aerobios y crear un perfil del mismo para determinar la eficiencia de la aireación.

Si se identifican insuficiencias en la aireación debe revisarse el estado del motor (conforme se explicó en las secciones anteriores), el estado de la tubería y el mantenimiento a los sistemas de aireación. Si los equipos están al final de la vida útil o presentan fallas irreparables deben ser cambiados.



Debe evaluarse el estado de los sensores de OD, si estos discrepan de los resultados obtenidos en la evaluación energética, deben ser reparados o cambiados, dado que estos son necesarios para detectar problemas en el funcionamiento de la aireación. Adicionalmente, los registros de OD generan información útil para programar el control automático de la velocidad del aireador, en caso tal de que estos sean instalados.

Se recomienda que los mezcladores sólo sean utilizados cuando el aireador no está funcionando, lo que reducirá aún más el consumo de energía de estos procesos.

Dada la variedad de equipos aireadores se sugiere establecer un plan de mantenimiento acorde con las especificaciones del fabricante y manual del equipo, pudiendo incluir según aplique a verificación del filtro de aspiración, de los sistemas de ventilación, entre otros.

Así mismo, evaluar configuraciones que permitiesen generar ahorros operativos garantizando efectividad en la transferencia de oxígeno disuelto, como sistemas de aireación por turbulencias y salto hidráulicos en combinación con los sistemas de aire comprimido.

4.3.2 Otras medidas

- a. Es necesario realizar una evaluación de la eficiencia energética de la STAR tanto en periodos secos como húmedos, con el objeto de evaluar si el sistema es eficiente aún con cambios en la calidad y volumen de los vertimientos tratados, es posible encontrar que para épocas secas los sistemas de bombeo se encuentren sobredimensionados, y debe evaluarse la posibilidad de adquirir equipos (previa evaluación beneficio/costo) de menor capacidad para estos periodos del año.
- b. A largo plazo, previo análisis costo-beneficio y TIR, implementar variadores de velocidad (de los cuales se hablará en la siguiente sección) y arrancadores de estado sólido con el objeto de disminuir golpes de ariete con el uso de la electrónica de potencia, de igual forma, se recomienda la instalación de variadores de velocidad.
- c. Evaluar acorde con las condiciones de diseño y operación de cada sistema, diferentes tecnologías que ofrece el mercado para los sistemas de aireación considerando no solo los costos iniciales (adquisición e instalación) sino los costos operativos y de mantenimiento, proyectando así cambios de equipos a mediano y largo plazo en caso tal de encontrar que nuevos equipos pueden ser más favorables para el sistema de tratamiento. Por ejemplo un estudio para un sistema que trata 42.000 m³/día, realizado por Castell *et. al.* en 2011 en el que comparó un soplador de émbolos rotativos versus un turbocompresor de alta velocidad con levitación magnética les permitió concluir que éste último generaba un ahorro energético del 42%, una reducción de los costos operativos del 35%; según el autor, la mayor eficiencia energética del equipo se debe a que éste trabaja con un mayor rango de presión, implicando variaciones pequeñas de la misma asociadas a la apertura y cierre de las válvulas motorizadas, a la ausencia de rozamiento y a una reducción del 5% en las pérdidas energéticas por correas de transmisión.



- d. Previo análisis de los requerimientos energéticos y térmicos de las STAR, evaluar la posibilidad de uso del biogás generado en procesos anaeróbicos para el calentamiento de digestores y para el suministro de energía dentro del sistema, en lugar de que este sea simplemente quemado en tea, reduciendo costos operativos y adicionalmente emisiones de gases efecto invernadero.
- e. Promover y/o desarrollar programas de concientización que permitan:
- Reducir el consumo de agua potable.
 - Implementar programas de reúso del agua.
 - Evitar que la población arroje al alcantarillado sustancias indebidas como preservativos, aceites, medicamentos, objetos sólidos.
 - Fortalecer los programas de gestión de residuos sólidos y residuos especiales como los escombros, que son arrojados a canales.
 - Incrementar el uso de detergentes biodegradables.
 - Empoderar a la ciudadanía para que ejerza presión ciudadana sobre industrias y locales comerciales (v.g industrias pequeñas, talleres mecánicos, etc) que realizan vertimientos sobre cuerpos de agua o alcantarillados, incumpliendo la normatividad a los organismos de control competente.
 - Medidas que permiten reducir los vertimientos de agua servida humana, y disminuyen el impacto antrópico sobre éstos.
- f. En Colombia en su mayoría los sistemas de alcantarillado son combinados, con lo cual se mezclan las aguas servidas con las aguas lluvias, lo cual genera un mayor volumen de agua a tratar e incrementa los costos. Bajo este contexto, es de gran importancia que los gobiernos locales puedan incrementar las inversiones que permitan mejorar y desarrollar los sistemas de drenaje urbano y promover las inversiones para separar los alcantarillados domiciliarios de los pluviales.

Estos programas inciden en la calidad y cantidad de vertimientos generados y como consecuencia tienen un impacto directo en la cantidad de energía requerida en el sistema para tratarlos.

4.4 Medidas relacionadas con el suministro energético

4.4.1 Energía suministrada al sistema.

Una vez se tiene plenamente identificada la demanda energética del sistema, se recomienda verificar el contrato que el prestador de los servicios de acueducto y/o alcantarillado tiene con la empresa de energía y evaluar las diferentes opciones que ésta puede ofrecerle acorde con el tipo de medición que se esté realizando (alta, media o baja tensión), incluso la venta de energía si aplica.

En caso de evaluarse la posibilidad de un cambio, por ejemplo, de baja a alta tensión es necesario realizar un análisis costo-beneficio integral (incluyendo cambio de equipos que esto implicaría como transformadores, entre otros) y establecer los respectivos indicadores financieros propios para una decisión de esta magnitud, antes de efectuar el cambio en el tipo de contrato.



4.4.2 Usuario final

A través de programas para el uso eficiente y ahorro del agua, los prestadores del servicio de acueducto fomentan el uso racional del recurso, involucrando al usuario final mediante campañas educativas y la implementación de tecnologías de bajo consumo. Estas medidas buscan concientizar a los usuarios e incluso lograr reducciones en la tarifa del servicio.

Bajo este contexto se pueden implementar las siguientes medidas:

- Diseñar programas de instalación y financiación de elementos que permitan reducir los consumos de agua tales como sanitarios ahorradores
- Utilizar grifería controladora de flujo, tabletas de detección de fugas, electrodomésticos eficientes (lavadoras y lavaplatos) y demás medidas contempladas por la Ley de Uso Eficiente y Ahorro de Agua (373 de 1997).
- Implementar incentivos que se conviertan en refuerzos positivos o de refuerzo frente a reducciones sustanciales en el consumo de agua.
- Diseñar metodología que permitan al operador estar seguro que el usuario entiende las facturas por concepto de acueducto y alcantarillado, ya que a través del entendimiento de las mismas los usuarios pueden hacer un mejor control de sus consumos.



Referencias Bibliográficas

- ANDESCO- BID. Base para la formulación de un Plan de Ahorro y Eficiencia Energética para las Empresas de Acueducto y Alcantarillado (2010).
- Carrier Corporation. Variable frequency drive operation and application of variable frequency drive (vfd) technology (2005).
- Castell D. et al. Optimización energética del sistema de aireación de una EDAR. Análisis comparativo de dos tecnologías. No.327 Tecnología del agua (2011).
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Evaluación de sistemas de bombeo de agua. Manual de eficiencia energética, primera edición (2011).
- Caporali Sergio. Control de pérdidas y uso eficiente del agua. PAHO.
- Consortium for Energy Efficiency (CEE) National Municipal Water and Wastewater Facility Initiative (2010).
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). Gobierno Federal. Estudio integral de sistemas de bombeo de agua potable municipal (2011).
- Comisión Nacional del Agua. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana Unidad de Agua Potable y Saneamiento. Gerencia de estudios y Proyectos Coordinación de Electromecánica. Términos de Referencia Electromecánicos. Documentos Técnicos, México (2013).
- Efficiency & Renewable Energy, operated by the Alliance for Sustainable Energy, LLC. (NREL). Energy Efficiency Strategies for Municipal Wastewater Treatment Facilities NREL/TP-7A30-53341 (2012).
- Ley 373 de 1997. Uso Eficiente y Ahorro de Agua.
- Ministerio de Minas y Energía, Cámara de Comercio - seccional Antioquia. Presentación “Modificaciones al Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE” (2013).
- Ministerio de Minas y Energía. Cartilla: “Etiquetado energético Colombia”
<https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/794708/CartillaEtiquetadoEnergetico02-08-2016.pdf/b38c11fd-ddad-4215-8168-524cc3a98599>
- Normas ISO 50000.
- Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE para la República de Colombia (2013).
- Resolución 90708 de 2013 del Ministerio de Minas y Energía, por la cual se expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).
- Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público - RETILAP. Resolución 181331 de 2009, mediante la cual se adopta el RETILAP.
- Resolución 40031 de febrero 5 de 2021 por la cual se amplía la vigencia del Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público - RETILAP.
- Resolución 0431 del 31 de agosto de 2020, “Por el cual se adopta el Plan Integral de Gestión de Cambio Climático Sectorial – PIGCCS, del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio”.
- Resolución 0330 de 2017 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS
- SEMARNAT. Manual de incremento de eficiencia física, hidráulica y energética en sistemas de agua potable. ISBN: 978-607-7908-68-5. México (2012).
- Universidad Pontificia Bolivariana, Colciencias, EEP de Medellín. Gestión Energética. Herramientas para el control de variables por proceso. Medellín. (2001).
- Universidad Pontificia Bolivariana, EEP de Medellín. Software de Gestión Energética GenWEB.



UPME. Guía didáctica para el desarrollo de auditorías energéticas (2007).

UPME. Guía para la implementación de Sistemas de gestión integral de la energía (2008).

UPME. Página WEB <http://www.si3ea.gov.co>, última vez visitada abril 23 de 2014.

UPME. Manual de optimización de sistemas de bombeo (2018).

U.S. Environmental Protection Agency (EPA) and Global Environment and Technology Foundation. Ensuring a Sustainable Future: An Energy Management Guidebook for Wastewater and Water Utilities (2008).

USAID, México. Manual para un proyecto de eficiencia energética e hidráulica integral en un sistema de agua y saneamiento Mexico low emissions development program (MLED).

Vela Antonio, Martínez Fernando, García-Serra Jorge y Pérez Rafael. Estrategias óptimas para la reducción de pérdidas de agua en sistemas de abastecimiento. Universidad Politécnica de Valencia. Fugas en abastecimientos Vol. 1 No. 1 p. 35-54, (1994).

Variable-frequency drive. Use in the water/wastewater treatment process. Tomado de: <http://www.energy.ca.gov/process/pubs/vfds.pdf>, última vez visitada diciembre 27 de 2013.

Watergy, Compendio de casos para estudio: Estocolmo, Suecia - Eficiencia de la energía utilizada en el suministro de agua. Proyecto Hammarby Sjöstad.



ANEXO I. Descripción de mediciones a realizar

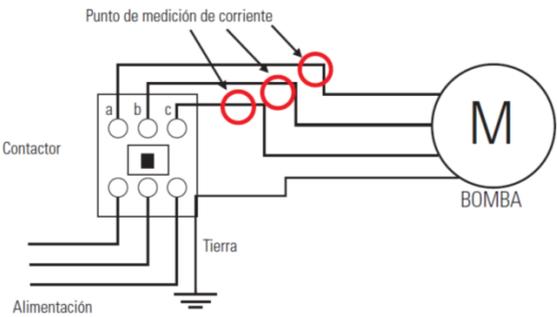
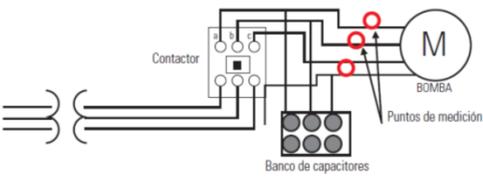
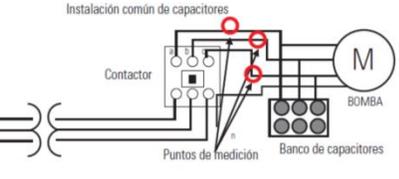
En este anexo se presentan los principales parámetros eléctricos e hidráulicos a medir y el mecanismo de cómo hacerlo, acogiendo las sugerencias presentadas en el informe del BID, 2011.

Parámetros eléctricos

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

Parámetro y equipo	Procedimiento	Gráfico
<p>Medición de la tensión eléctrica (voltaje) Para la medición en equipos de bombeo, es necesario utilizar un voltímetro</p>	<ol style="list-style-type: none"> 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. 	<p>Figura 7. Medición de la tensión (voltaje) en equipos de bombeo</p> <p>Nota: La Figura 7 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.</p>



Parámetro y equipo	Procedimiento	Gráfico
<p>Medición de la corriente eléctrica (Amperios) Para la medición en equipos de bombeo se utiliza un amperímetro</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 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 Ia, Ib, Ic, respectivamente. Con estos tres valores se calcula (Ipt) y la corriente eléctrica trifásica total (Itt). 2. 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. 	<p>Figura 8. Medición de corriente eléctrica en equipos de bombeo</p>  <p>Nota: La Figura 8 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.</p>
<p>Medición del factor de potencia y cálculo de la potencia eléctrica</p>	<p>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.</p>	<p>Figura 9. Medición de la potencia real después de los capacitores</p> 
<p>Medición de la potencia real o activa Para la medición se utiliza un vatímetro, el cual se coloca a la salida del contactor en los cables que van hacia el motor.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 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". <p>Si el equipo de bombeo tiene instalado un banco de capacitores, se sugiere hacer dos mediciones (ver figuras).</p> <ul style="list-style-type: none"> • La primera de ellas se debe realizar corriente abajo del punto de conexión del banco de capacitores, en los conductores que van 	<p>Figura 10. Medición de la potencia real antes de los capacitores</p> 



Parámetro y equipo	Procedimiento	Gráfico
	<p>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.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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. 	<p>Nota: Las Figuras 9 y 10 solo se aplican a partida directa, por lo que deberán ajustarse a cada situación particular, considerando mediciones con un partidador estrella triángulo, partidador suave o variador.</p>

Fuente. Adaptado (imágenes y texto) BID, 2011

Parámetros hidráulicos

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> a. Medición del caudal a la descarga en la bomba (Q). b. Medición de la carga de presión de operación, en la succión (Ps) y descarga (Pd). c. Definición del nivel de referencia (Nr). d. Medición del nivel dinámico de succión (Ns). | <ul style="list-style-type: none"> e. Medición de niveles a centros de manómetros (Dr-m), tanto en la succión como en la descarga. |
|---|---|

Parámetro	Procedimiento
Medición del caudal a la descarga de la bomba	<ul style="list-style-type: none"> • Debe realizarse la medición de caudales en cada una de las captaciones productoras de agua para la red y efectuarse exactamente en la tubería donde ingresa el agua a la red de distribución. • En los casos de potabilizadoras, tanques o bombeos, es importante 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 y el equipo esté debidamente calibrado. • Cuando no existe macromedidor en la captación, se recomienda utilizar un medidor portátil del tipo ultrasónico o electromagnético, por la alta exactitud que ofrecen y la versatilidad en su uso. Este medidor debe estar certificado por un laboratorio de pruebas acreditado. • La posición del medidor en la tubería de prueba debe ser en tramos rectos y preferiblemente 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. La distancia que debe dejarse tanto aguas arriba como aguas abajo del eje del medidor debe ser consultada en los respectivos catálogos del fabricante. • Se podrá instalar el medidor en un conducto inclinado o vertical siempre y cuando lo permita el fabricante en sus limitaciones de exactitud y cuando se asegure que la tubería de pruebas esté completamente llena en toda su sección. También, para garantizar la medición adecuada, deberá evitarse colocar el medidor en aquellos tramos donde existan burbujas de aire o sólidos en suspensión.
	<ul style="list-style-type: none"> • La medición de caudal suministrado se efectúa en un periodo corto, del orden de 15 a 30 minutos. Si no se detectan variaciones de caudal de $\pm 5\%$, se considerará el valor registrado como el valor de gasto medio suministrado a la red por esta captación. En



Parámetro	Procedimiento
	<p>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.</p> <ul style="list-style-type: none"> En el caso de instalaciones electromecánicas con una batería de varios equipos, como por ejemplo los bombes o la medición de caudal debe hacerse por equipo individual, cuidando que se encuentre en la condición de operación más usual.
Medición de las cargas de presión de succión y descarga (m.c.a)	<ul style="list-style-type: none"> 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 que se encuentre calibrado, y de que se use en el tercio medio de su escala, puesto que es donde tiene una óptima exactitud. Las mediciones de presión de succión y descarga deben 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 que no aplica la medición de succión.
Definición del nivel de referencia	<p>Normalmente el nivel de referencia se ubica sobre la placa base de montaje del motor, como se observa esquemáticamente en las Figura 11-13 (Fuente: BID, 2011). Esto permitirá desarrollar el cálculo de la carga hidráulica total de bombeo.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="468 662 940 1049"> <p>Figura 11 Medición de niveles en caso de tener únicamente manómetro en la descarga</p> </div> <div data-bbox="940 662 1409 951"> <p>Figura 12. Medición de niveles en caso de contar con manómetros en succión y descargas.</p> </div> <div data-bbox="1409 662 1911 1089"> <p>Figura 13. Medición de niveles en equipos sumergibles.</p> </div> </div>
Medición del nivel dinámico de succión	<p>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.</p> <p>La medición puede realizarse con una sonda de nivel o con un flexómetro, de acuerdo con las condiciones del lugar.</p> <ul style="list-style-type: none"> Para un cárcamo de bombeo, el nivel dinámico de succión será el nivel de la superficie libre del agua dentro del cárcamo. Para un pozo, el nivel de succión corresponderá a su nivel dinámico en el acuífero. <p>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.</p>
Medición de niveles a centros de	Medición de niveles a centros de manómetros



Parámetro	Procedimiento
<i>manómetros, tanto en la succión como en la descarga.</i>	En las Figuras 9 y 10 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 Dr-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 Dr-md, y para el caso del manómetro de succión, como Dr-ms.

Fuente. Adaptado (imágenes y texto) BID, 2011



ANEXO II. Lecturas recomendadas

- MANUAL PARA UN PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA INTEGRAL EN UN SISTEMA DE AGUA Y SANEAMIENTO MEXICO LOW EMISSIONS DEVELOPMENT PROGRAM (MLED).
CONTRACT: MLED GRANT 002 (US0397-PO-13-0295)
MITIGACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR EL EXCESIVO CONSUMO DE ENERGÍA UTILIZADO EN EL SUMINISTRO DE AGUA A LAS POBLACIONES, A TRAVÉS DEL USO EFICIENTE DE LA MISMA. USAID, México.
- MANUAL DE OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE BOMBEO. UPME, Colombia. 2018.
- EVALUACIÓN PARA SISTEMAS DE BOMBEO DE AGUA. MANUAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA. BID, Washington 2011.