

Del consumo energético a la recuperación de energía en el sector de agua y saneamiento en América Latina y el Caribe

**Auditorías energéticas y aprovechamiento
del metano a partir de aguas residuales**

Silvia Saravia Matus
Diego Fernández
Pedro Chavarro
Alfredo Montañez
Elizabeth Coble Fernández



NACIONES UNIDAS

C E P A L

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



NACIONES UNIDAS

CEPAL

Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

Deseo registrarme

Conozca nuestras redes sociales y otras fuentes de difusión en el siguiente link:



<https://bit.ly/m/CEPAL>



Del consumo energético a la recuperación de energía en el sector de agua y saneamiento en América Latina y el Caribe

Auditorías energéticas y aprovechamiento
del metano a partir de aguas residuales

Silvia Saravia Matus

Diego Fernández

Pedro Chavarro

Alfredo Montañez

Elizabeth Coble Fernández



NACIONES UNIDAS

CEPAL

Este documento fue preparado por Silvia Saravia Matus, Oficial de Asuntos Económicos de la Unidad de Agua y Biodiversidad de la División de Recursos Naturales de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), y por Diego Fernández, Pedro Chavarro, Alfredo Montañez y Elizabeth Coble Fernández, Consultores de la misma Unidad y División. El documento se preparó en el marco de la iniciativa Red y Observatorio para la Sostenibilidad del Agua (ROSA) de la CEPAL y fue financiado por la Cuenta de las Naciones Unidas para el Desarrollo en su tramo 15.

Las Naciones Unidas y los países que representan no son responsables por el contenido de vínculos a sitios web externos incluidos en esta publicación.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización o las de los países que representa.

Publicación de las Naciones Unidas
ISSN 2664-4541 (versión electrónica)
ISSN 2664-4525 (versión impresa)
LC/TS.2026/75
Distribución, L
Copyright © Naciones Unidas, 2026
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.2600459[S]

Esta publicación debe citarse como: Saravia Matus, S., Fernández, D., Chavarro, P., Montañez, A., y Coble Fernández, E. (2026). Del consumo energético a la recuperación de energía en el sector de agua y saneamiento en América Latina y el Caribe: auditorías energéticas y aprovechamiento del metano a partir de aguas residuales. *Serie Recursos Naturales y Desarrollo* (232) (LC/TS.2026/75). Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Resumen	7
Introducción	9
I. El balance energético del sector de agua y saneamiento: consumo, ineficiencias y potencial de recuperación	13
A. Consumo e intensidad energética del sector de agua y saneamiento a nivel mundial.....	14
B. Consumo de energía del sector agua y saneamiento en América Latina y el Caribe	18
II. Auditorías energéticas como herramienta para la gestión energética integral	21
A. Objetivos de la auditoría energética	22
B. Normas y referentes internacionales	23
1. Norma ISO 50001: sistemas de gestión de la energía	23
2. Norma ISO 50002: auditorías energéticas	24
C. Alcance del protocolo de auditoría energética	24
D. Definiciones	26
E. Fases del proceso de auditoría energética	27
1. Fase 1: Planeación de la auditoría	28
2. Fase 2: Evaluación energética de procesos clave	29
3. Fase 3: Identificación y priorización de oportunidades de mejora	36
4. Fase 4: Plan de implementación, seguimiento y verificación	38
III. Medidas y oportunidades para la eficiencia y recuperación energética en agua y saneamiento	39
A. Medidas de eficiencia energética y optimización operativa.....	40
1. Manejo de carga de energía en sistemas de agua y saneamiento	40
2. Sistemas de control y gestión de datos	40
3. Variadores de frecuencia	41
4. Sustitución de motores y equipos de baja eficiencia.....	41
B. Fuentes renovables y recuperación energética en el sector de agua y saneamiento	43
1. Energía solar fotovoltaica	43

2.	Aprovechamiento del metano a partir de aguas residuales	44
3.	Criterios para seleccionar alternativas de generación y recuperación energética.....	45
C.	De la oportunidad técnica al aprovechamiento energético	46
IV.	Marco regulatorio e incentivos para el aprovechamiento energético del biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales.....	47
A.	Marco jurídico para la recuperación energética del biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales en países seleccionados	48
1.	Bolivia	48
2.	Colombia	48
3.	Costa Rica.....	49
4.	México.....	49
5.	Perú.....	49
6.	Síntesis del encuadre jurídico del aprovechamiento energético del biogás en PTAR.....	49
B.	Incentivos y mecanismos de remuneración para el aprovechamiento energético del biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales.....	50
1.	Bolivia	50
2.	Colombia	50
3.	Costa Rica.....	51
4.	México.....	51
5.	Perú.....	51
6.	Síntesis de incentivos y mecanismos de remuneración identificados	51
V.	Caso aplicado: estimación del potencial energético del metano en PTAR en Colombia	53
A.	Alcance del caso	54
B.	Consolidación de la muestra de PTAR.....	54
C.	Caracterización de las PTAR analizadas	55
D.	Estimación del potencial de metano y generación energética.....	56
E.	Evaluación financiera preliminar del aprovechamiento energético	58
F.	Impactos ambientales asociados	59
G.	Lecciones del caso colombiano para la región.....	59
VI.	Conclusiones	61
	Bibliografía.....	63
	Serie Recursos Naturales y Desarrollo publicados	65
	Cuadros	
Cuadro 1	Síntesis del encuadre jurídico del aprovechamiento energético del biogás en PTAR	50
Cuadro 2	Síntesis de incentivos y mecanismos de remuneración identificados	52
Cuadro 3	Secuencia de consolidación de información de la muestra de PTAR	55
Cuadro 4	Caracterización de la muestra por tipo de tecnología.....	56
Cuadro 5	Metano recuperable estimado por región y departamento	57
Cuadro 6	Metano recuperable por tipo de tecnología de tratamiento	57
Cuadro 7	Síntesis de la evaluación económica preliminar.....	58
	Gráficos	
Gráfico 1	Cifras de consumo e intensidad energética del sector de agua potable	16
Gráfico 2	Cifras de consumo e intensidad energética del sector de saneamiento	16
Gráfico 3	Emisiones mundiales de metano (CH ₄) del sector de agua potable y saneamiento	17
Gráfico 4	Distribución promedio del consumo de energía, sector de agua potable y saneamiento (América Latina y el Caribe, 2015)	18

Recuadros

Recuadro 1	Fórmulas de referencia para estimar pérdidas hidráulicas y energía de bombeo	36
Recuadro 2	La Calculadora de Metano de la CEPAL: estimación preliminar del potencial energético en plantas de mediano y menor tamaño.....	44

Diagramas

Diagrama 1	Publicaciones internacionales sobre eficiencia energética en el sector de agua y saneamiento	15
Diagrama 2	Consumo e intensidad energética del sector de agua potable y saneamiento en México, El Salvador y Panamá.....	20
Diagrama 3	Resumen de principales medidas de eficiencia energética y recuperación de energía en el sector de agua y saneamiento	25
Diagrama 4	Metodología para aplicar auditorías energéticas en el sector de agua potable y saneamiento	28
Diagrama 5	Esquema general de secuencia energética y balance de energía para un sistema de suministro de agua.....	33
Diagrama 6	Resumen de medidas operativas y de inversión	42
Diagrama 7	Resumen de medidas de eficiencia energética en suministro, redes y plantas de tratamiento.....	42

Resumen

Los servicios de agua potable y saneamiento ocupan una posición estratégica en la transición hacia modelos de desarrollo más sostenibles: son consumidores intensivos de energía y, al mismo tiempo, pueden convertirse en espacios de recuperación y generación energética. Cada metro cúbico de agua captado, tratado, transportado y distribuido demanda energía; a su vez, las aguas residuales contienen recursos que pueden ser valorizados, incluido el metano generado en los procesos de tratamiento.

Este documento analiza la gestión energética del sector de agua y saneamiento en América Latina y el Caribe desde una perspectiva integrada. En primer lugar, examina los requerimientos energéticos del sector y las principales fuentes de ineficiencia energética asociadas a captación, bombeo, distribución, tratamiento de agua potable, recolección y tratamiento de aguas residuales. En segundo lugar, presenta las auditorías energéticas como una herramienta de gestión para identificar los principales puntos de consumo, pérdidas, equipos sobredimensionados, fallas operativas y oportunidades de mejora técnica, económica y ambiental en el uso de la energía en este sector.

El documento sostiene que la eficiencia energética no debe entenderse únicamente como una estrategia de ahorro, sino como una vía para mejorar la productividad, sostenibilidad financiera y resiliencia de los prestadores. Bajo este enfoque, las auditorías permiten construir carteras de medidas que combinan optimización operativa, inversiones en tecnologías eficientes, automatización, manejo de carga, incorporación de energías renovables y recuperación energética.

Especial atención se otorga al aprovechamiento del metano a partir de aguas residuales. Capturado y transformado en biogás, el metano puede reducir emisiones, generar energía para autoconsumo o excedentes para la entrega a la red, disminuir costos operativos y fortalecer la economía circular en el saneamiento. Finalmente, el documento examina condiciones regulatorias e incentivos en países seleccionados para la generación de energía eléctrica a partir del metano y presenta el caso de Colombia como una aplicación concreta para estimar potencial energético, beneficios económicos, emisiones evitadas y oportunidades de inversión en el aprovechamiento del metano generado en plantas de tratamiento municipales de menor tamaño, como un ejemplo relevante para escalar soluciones replicables en la región, con base en evidencia técnica y financiera disponible.

Introducción

En América Latina y el Caribe, la operación de los servicios de agua potable y saneamiento depende de manera creciente de una gestión energética más eficiente, flexible y sostenible. Su funcionamiento requiere energía de manera continua: desde la captación y elevación del agua cruda hasta su potabilización, transporte, distribución, recolección, tratamiento y disposición final. En sistemas con alta dependencia de bombeo, fuentes alejadas, redes extensas, desniveles significativos, equipos envejecidos o plantas de tratamiento con procesos electromecánicos intensivos, la energía puede convertirse en uno de los principales condicionantes técnicos, económicos y ambientales del servicio.

Sin embargo, esta relación no debe entenderse únicamente desde la perspectiva del consumo. Si bien el sector de agua y saneamiento es un consumidor intensivo de energía, ofrece al mismo tiempo un espacio con potencial para recuperar y generar energía a partir de sus propios procesos. Esta doble condición obliga a ampliar la mirada tradicional sobre la eficiencia energética en el sector. No se trata solo de reducir el consumo eléctrico o disminuir la factura de energía, sino de gestionar mejor la demanda, reducir pérdidas, optimizar activos, incorporar tecnologías eficientes y aprovechar recursos energéticos que hoy suelen desaprovecharse dentro del propio ciclo urbano del agua.

Esta perspectiva resulta especialmente relevante para América Latina y el Caribe. La región enfrenta el desafío simultáneo de ampliar cobertura, mejorar calidad y continuidad de los servicios, incrementar el tratamiento de aguas residuales, reducir emisiones, adaptarse al cambio climático y fortalecer la sostenibilidad financiera de los prestadores. Estos objetivos difícilmente podrán alcanzarse si la expansión y modernización de los sistemas reproduce esquemas de operación costosos, intensivos en energía y poco eficientes. La agenda sectorial requiere, por tanto, una mirada integrada: no basta con construir más infraestructura; también es necesario operar mejor la infraestructura existente, reducir pérdidas, optimizar procesos y valorizar los recursos que se encuentran dentro del propio sistema.

Desde esta perspectiva, la gestión energética en agua y saneamiento debe ser entendida como una agenda de productividad, sostenibilidad y resiliencia. La energía no es solo un insumo operativo, sino una variable estratégica que permite observar el desempeño real de los sistemas. El análisis de los patrones de consumo energético puede revelar pérdidas hidráulicas, ineficiencias en bombeo, sobredimensionamiento de equipos, operación fuera de rangos óptimos, falta de mantenimiento, baja automatización, deficiencias

en la medición o ausencia de información suficiente para la toma de decisiones. En consecuencia, mejorar la eficiencia energética no solo reduce costos; también mejora la gestión de activos, la confiabilidad operativa y la capacidad de los prestadores para sostener y ampliar los servicios.

Las auditorías energéticas constituyen el punto de entrada para transformar esta agenda en decisiones concretas. Su valor no radica únicamente en medir consumos, sino en interpretar la operación de los sistemas a partir de evidencia. Una auditoría energética permite identificar dónde se concentra el uso de energía, qué procesos explican las mayores ineficiencias, qué equipos requieren intervención, qué pérdidas pueden reducirse y qué medidas ofrecen mayor viabilidad técnica, económica y ambiental. Asimismo, permite construir una cartera de oportunidades que puede incluir acciones operativas de bajo costo, inversiones en tecnologías más eficientes, automatización, manejo de carga, uso de fuentes renovables y recuperación energética en una estrategia de intervención de corto, mediano y largo plazo.

En este sentido, las auditorías energéticas no deben concebirse como un ejercicio aislado de diagnóstico, sino como una herramienta de gestión para priorizar inversiones, sustentar decisiones regulatorias, orientar planes de mejora y generar proyectos con beneficios verificables. Al traducir problemas operativos en soluciones cuantificables —con estimaciones de ahorro, inversión requerida, retorno esperado y reducción de emisiones— las auditorías contribuyen a cerrar la brecha entre diagnóstico técnico e implementación efectiva. Esta función es especialmente relevante en contextos de restricciones financieras, altos costos energéticos y crecientes exigencias de sostenibilidad.

La gestión energética del sector, sin embargo, no se limita a consumir menos. También implica reconocer que los sistemas de saneamiento pueden recuperar energía a partir de sus propios procesos. Las plantas de tratamiento de aguas residuales, tradicionalmente concebidas como infraestructuras destinadas a remover contaminantes, pueden convertirse en unidades de recuperación de recursos. Así, bajo un enfoque de economía circular, el tratamiento de aguas residuales deja de ser visto únicamente como un costo económico en beneficio del ambiente y comienza a entenderse como una oportunidad para recuperar agua, nutrientes, biosólidos y energía.

El metano generado en los procesos de tratamiento de aguas residuales resume con claridad esta posibilidad. Cuando se libera a la atmósfera, constituye un pasivo ambiental y climático. Cuando se captura y aprovecha, puede transformarse en biogás y utilizarse para generar energía eléctrica o térmica, reducir costos de operación, disminuir emisiones y fortalecer la sostenibilidad financiera de los prestadores. Esta doble condición —pasivo climático y recurso energético— explica por qué el aprovechamiento del metano se ha convertido en una línea estratégica para repensar el saneamiento desde una perspectiva de economía circular y transición energética.

El aprovechamiento energético del metano también plantea una pregunta regulatoria central: cómo transformar el potencial técnico de generación en valor económico para los prestadores. Para ello, no basta con estimar la cantidad de metano recuperable o la energía que podría generarse. Es necesario contar con marcos regulatorios que permitan definir si esa energía puede ser utilizada para autoconsumo, compensarse contra la factura eléctrica, venderse como excedente o incorporarse a esquemas de generación distribuida, autogeneración o remuneración de energías renovables. Por esta razón, el análisis regulatorio constituye una dimensión clave de la gestión energética del saneamiento.

Esta publicación parte de una idea central: el sector de agua y saneamiento puede avanzar desde una lógica centrada en el consumo energético hacia una estrategia integral de eficiencia, recuperación y valorización de energía. A través de esta agenda se conectan los costos de prestación, la modernización tecnológica, la reducción de emisiones, la economía circular, la regulación energética y la sostenibilidad financiera de los prestadores. En este sentido, la gestión energética ilustra la función del agua como superconector del desarrollo sostenible: una intervención en el sector agua puede generar beneficios simultáneos para la seguridad energética, la acción climática, la productividad de los servicios, la calidad ambiental y la implementación de inversiones sostenibles.

El documento se organiza en torno a esta lógica. En primer lugar, se analizan los requerimientos energéticos del sector de agua y saneamiento y las principales fuentes de ineficiencia en el uso de la energía en los sistemas de abastecimiento, distribución, recolección y tratamiento. En segundo lugar, se presentan las auditorías energéticas como herramienta de gestión para identificar, cuantificar y priorizar oportunidades de mejora. En tercer lugar, se examinan medidas de eficiencia y recuperación energética, incluyendo manejo de carga, automatización, tecnologías eficientes, fuentes renovables y aprovechamiento del metano. En cuarto lugar, se revisan marcos regulatorios e incentivos para la valorización energética del biogás en países seleccionados de América Latina. Finalmente, se presenta el caso de Colombia como una aplicación concreta para estimar el potencial energético del metano a partir de aguas residuales, sus beneficios económicos, sus impactos ambientales y sus condiciones de escalamiento.

Con ello, el documento busca aportar una mirada integrada para que los prestadores, reguladores y responsables de política pública, puedan pasar de diagnósticos generales sobre consumo energético a estrategias concretas de eficiencia, recuperación de recursos e inversión sostenible. La energía, entendida de esta manera, permite ordenar una agenda de transformación para los servicios de agua y saneamiento: reducir costos, mejorar desempeño operativo, disminuir emisiones y convertir residuos y subproductos del tratamiento en activos para el desarrollo sostenible.

I. El balance energético del sector de agua y saneamiento: consumo, ineficiencias y potencial de recuperación

La gestión energética del sector de agua potable y saneamiento debe analizarse desde una perspectiva integral. Por una parte, los servicios requieren energía en todas las etapas de la prestación: captación, elevación, potabilización, transporte, distribución, recolección, tratamiento de aguas residuales y manejo de lodos. Por otra, algunos de esos mismos procesos, en particular el tratamiento de aguas residuales, pueden generar oportunidades para recuperar energía y reducir emisiones mediante el aprovechamiento de subproductos como el metano.

Esta doble condición —el sector como consumidor de energía y como potencial recuperador de energía— permite comprender mejor la relevancia de las auditorías energéticas. No se trata únicamente de medir consumos o reducir costos eléctricos, sino de identificar dónde se concentran los requerimientos de energía, qué procesos generan mayores ineficiencias, qué pérdidas pueden reducirse y qué oportunidades existen para transformar residuos o subproductos del saneamiento en recursos energéticos aprovechables.

De acuerdo con la CEPAL (2015), la problemática de la eficiencia energética en los servicios de agua potable y alcantarillado se extienden en prácticamente todas las actividades de estos servicios, desde la captación, potabilización y distribución de agua, así como en la recolección, disposición y tratamiento de aguas residuales y la gestión de los lodos resultantes. Asimismo, incluye aspectos relacionados con los usos finales del agua. En este documento, el análisis se concentra principalmente en la oferta del servicio, es decir, en la producción, operación y costos asociados a la prestación de los servicios de agua y saneamiento.

Sobre esta base, el capítulo examina primero el peso del consumo energético y la intensidad energética del sector a nivel mundial y regional. Luego identifica los principales factores que explican las ineficiencias energéticas en los sistemas de agua y saneamiento, incluyendo condiciones topográficas, requerimientos de bombeo, antigüedad de equipos, pérdidas hidráulicas, baja automatización y limitaciones de información operativa. Finalmente, introduce la necesidad de avanzar desde una mirada centrada exclusivamente en el consumo hacia una perspectiva que incorpore también el potencial de recuperación energética dentro del ciclo del agua.

A partir de las cifras citadas por la CEPAL (2015) y otras fuentes internacionales, se evidencia que la energía constituye un insumo crítico, con una alta incidencia en los costos de prestación de los servicios de agua y saneamiento. En efecto, se estima que los gastos de electricidad representan entre el 5% y el 30% de los costos totales de operación de estos servicios públicos, y que pueden alcanzar hasta el 40% en algunos casos (ESMAP, 2012). Por su parte, Limaye y Welsien (2019) señalan que los costos de energía eléctrica podrían representar entre el 33% y el 82% de los costos operativos de los servicios de suministro y tratamiento de aguas.

En países como México y El Salvador se reportan casos en los que la participación de los gastos de energía puede superar el 80% del total de los costos operativos para algunos prestadores. En Ecuador, el principal consumidor de energía del país es el prestador de los servicios de agua y saneamiento de Guayaquil. De igual forma, en el caso del Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAA), prestador nacional de los servicios de agua y saneamiento en Panamá, la energía representa más del 50% de sus costos. Esta variación en la incidencia de los costos energéticos se explica por las condiciones particulares de prestación de los servicios, entre ellas la topografía, los requerimientos de bombeo y la distribución espacial de los usuarios.

En concordancia con lo anterior, se estima que en América Latina y el Caribe las plantas de abastecimiento de agua potable podrían reducir sus costos de energía entre un 10% y un 40%, porcentaje que podría elevarse hasta el 75% en el caso de las plantas de tratamiento de aguas residuales (United Nations World Water Assessment Programme, 2014). En esta misma línea, la CEPAL sostiene que “cualquier mejora en la eficiencia energética, ya sea por el ahorro de agua o de energía, se traduce directamente en una disminución de los costos y un incremento de la eficiencia económica” (CEPAL, 2015).

A. Consumo e intensidad energética del sector de agua y saneamiento a nivel mundial

El consumo y la intensidad energética del sector de agua y saneamiento tienen un impacto directo en los costos operativos, la sostenibilidad financiera de los prestadores y la huella ambiental de los servicios. La intensidad energética, entendida como la cantidad de energía utilizada por metro cúbico de agua producido, transportado, distribuido o tratado, varía significativamente entre regiones, fuentes de abastecimiento, tecnologías de tratamiento y condiciones operativas. En sistemas convencionales de agua potable con suministro por gravedad, puede ubicarse en niveles relativamente bajos, mientras que, en procesos intensivos, como la desalinización o ciertos tratamientos de aguas residuales, puede alcanzar valores significativamente elevados.

El sector del agua es uno de los mayores consumidores de energía a nivel mundial y, en la medida en que la cobertura de los servicios crece, también lo hace la necesidad de optimizar el uso de energía para asegurar un acceso sostenible al recurso. Se estima un incremento mundial en la demanda de servicios de suministro de agua y tratamiento de aguas residuales del 40% en los próximos 20 años (Limaye y Welsien, 2019). En América Latina y el Caribe se proyectan inversiones en rehabilitación de sistemas de agua potable por USD 108 mil millones y en saneamiento por USD 72 mil millones para el período 2020-2030 (CEPAL, 2023). Estos incrementos en demanda e inversión vendrán acompañados de incrementos más que proporcional en el uso de energía eléctrica pues se trata de servir a poblaciones más periféricas o en zonas de más difícil acceso (lo que explica en gran medida el resago en su cobertura) y el incremento de actividades (tratamiento de aguas residuales) y tecnologías (como desalinización u ósmosis inversa) de mayor intensidad energética.

Este aumento esperado de la demanda refuerza la importancia de gestionar la energía desde una perspectiva preventiva y estratégica. Si la expansión de cobertura y tratamiento reproduce patrones de operación ineficientes, los costos energéticos tenderán a aumentar junto con las necesidades de inversión. En cambio, si la planificación incorpora criterios de eficiencia, automatización, reducción de pérdidas y recuperación energética, la expansión de los servicios puede contribuir simultáneamente a mejorar la sostenibilidad financiera, reducir emisiones y aumentar la resiliencia operativa del sector.

El diagrama 1 resume un grupo de fuentes de información y publicaciones internacionales sobre temas de eficiencia energética en el sector de agua y saneamiento. Entre estas publicaciones se destacan: i) Evaluación para sistemas de bombeo de agua del Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2011); ii) Eficiencia energética y regulación económica en los servicios de agua potable y alcantarillado de la CEPAL (CEPAL, 2015); iii) Análisis de oportunidades potenciales de eficiencia energética y energías renovables en los servicios de agua municipales en México (SEMARNAT-INECC, 2021); iv) Guía para el desarrollo de auditorías de eficiencia energética y operativa en sistemas de tratamiento de agua de Colombia (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021); v) Guía para la optimización energética en sistemas de tratamiento de agua de Colombia (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021); y vi) estadísticas del sector de agua y saneamiento consolidadas por Global Water Intelligence (GWI), organización que presta servicios a la industria internacional del agua desde hace cerca de 20 años.

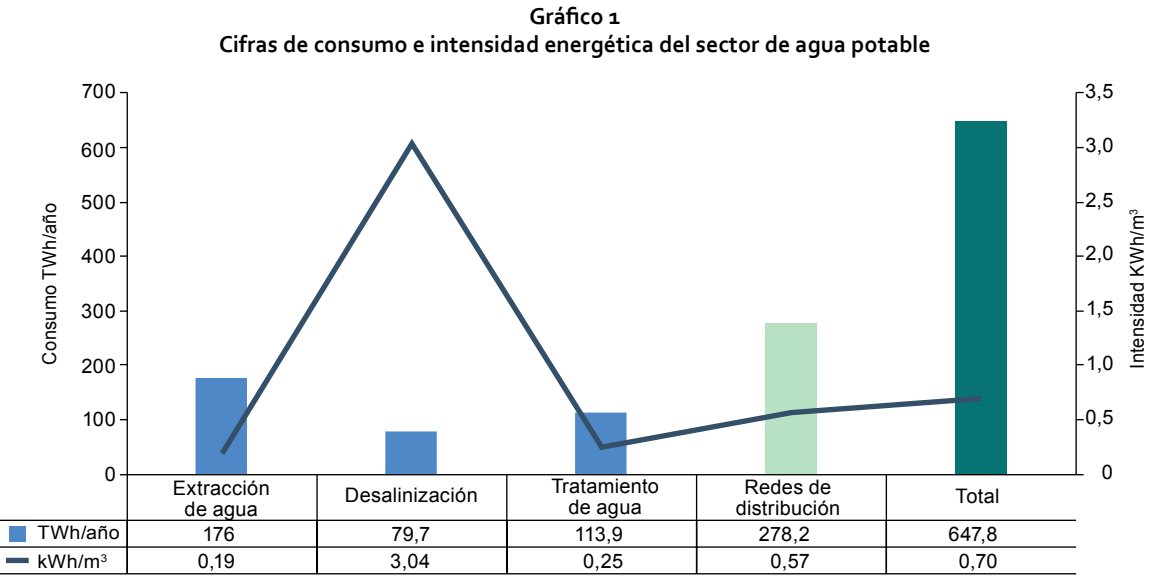
Diagrama 1
Publicaciones internacionales sobre eficiencia energética en el sector de agua y saneamiento



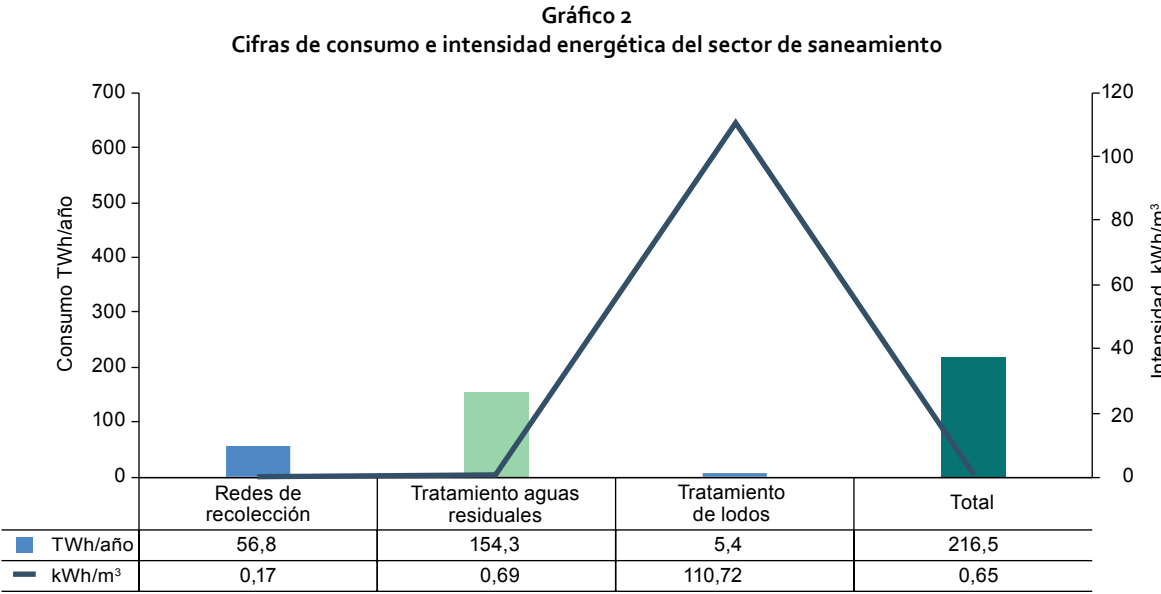
Fuente: (BID, 2011), (CEPAL, 2015) (SEMARNAT- INECC, 2021), (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021; GWI- Global Water Intelligence, 2022).

Estas fuentes permiten dimensionar no solo el volumen de energía consumida por el sector, sino también los procesos donde se concentran las mayores oportunidades de eficiencia, reducción de pérdidas y recuperación energética.

Al analizar las cifras de consumo e intensidad energética del sector de agua y saneamiento a nivel mundial compiladas por la GWI para 2018 y 2022, se encuentra que el consumo del sector equivale a cerca del 3,7% del consumo total mundial en 2020: 864,3 TWh frente a 22.495,2 TWh del resto de sectores. Esto equivale a cerca de dos veces el consumo anual de energía de Francia y al 67% del consumo total de energía de América Latina y el Caribe (véase gráficos 1 y 2). El consumo de energía del sector se distribuye entre cerca del 75% en las actividades de suministro y distribución de agua potable y el 25% restante en actividades de saneamiento.



Fuente: GWI - Global Water Intelligence, 2022.



Fuente: GWI-Global Water Intelligence, 2022.

Al considerar la distribución del consumo total de energía del sector en actividades asociadas con el suministro de agua, estimado en 647,8 TWh para 2022 (GWI, 2022), se encuentra que la mayor participación se da en el consumo energético en las redes de distribución, con 43% del total, equivalente a 278,2 TWh; seguido por la extracción de agua cruda, con 27%, equivalente a 176 TWh; y el tratamiento o potabilización de aguas dulces, con 17%, equivalente a 113,9 TWh. En términos de intensidad energética, los mayores niveles de uso por metro cúbico de agua suministrada se presentan en los procesos de desalinización, con un promedio cercano a 3 kWh/m³, lo cual contrasta con la intensidad relacionada con la potabilización de aguas dulces, cercana a 0,25 kWh/m³.

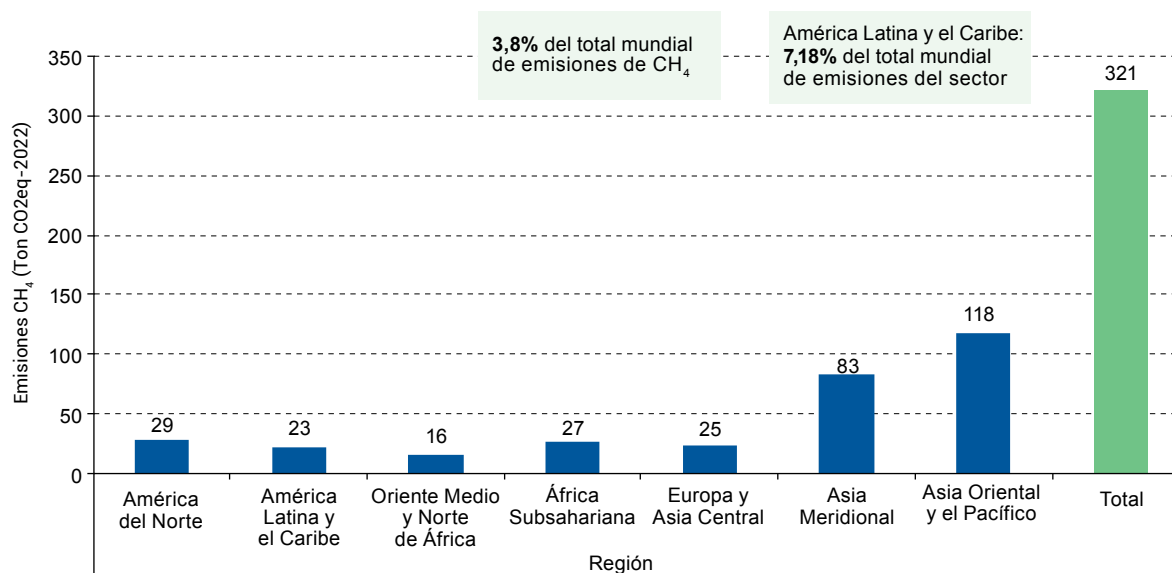
Respecto del consumo de energía para las actividades asociadas con el saneamiento, estimado en 216,5 TWh en 2022, la mayor participación se presenta en el tratamiento de las aguas residuales, con 71% del total, equivalente a 154,4 TWh; seguido de las redes de recolección de aguas residuales, con 26%,

equivalente a 56,8 TWh. Al revisar la intensidad energética, las cifras muestran que el tratamiento de aguas residuales demanda en promedio 0,69 kWh/m³. En el caso del tratamiento de lodos, la intensidad energética promedio se estima en 110 kWh por kilogramo de sólidos secos tratados. El proceso de aireación, en plantas de tratamiento biológico, puede ser responsable de hasta el 60% del consumo total de energía en estas instalaciones.

Estas cifras muestran que el saneamiento ocupa un lugar especialmente relevante dentro de la agenda energética del sector. Por una parte, el tratamiento de aguas residuales puede ser intensivo en consumo eléctrico, especialmente en procesos de aireación y manejo de lodos. Por otra, esos mismos procesos pueden generar subproductos con potencial de valorización energética. En particular, el metano producido en determinadas etapas del tratamiento puede ser capturado y aprovechado como biogás, convirtiendo un pasivo ambiental en una fuente de energía útil para reducir costos de operación y emisiones.

Respecto del total de emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI), se estima que las operaciones del sector de agua y saneamiento generan más de 400 millones de toneladas de CO₂ al año. Se debe destacar el aporte del sector en términos de emisiones de metano, gas con un potencial de calentamiento global entre 28 y 84 veces superior al del CO₂. Las cifras consolidadas por GWI muestran que el sector aportaría, para 2022, cerca de 320,5 millones de toneladas de CO₂ equivalente, equivalentes al 3,8% del total mundial de emisiones de metano. En el caso de América Latina y el Caribe, las emisiones de metano del sector de agua y saneamiento representan el 7,18% del total de emisiones de la región (véase el gráfico 3).

Gráfico 3
Emisiones mundiales de metano (CH₄) del sector de agua potable y saneamiento
(En Ton CO₂eq-2022)



Fuente: GWI-Global Water Intelligence, 2022.

En conjunto, la evidencia internacional muestra que el sector de agua y saneamiento enfrenta un doble desafío energético. El primero consiste en reducir la intensidad energética de sus operaciones, especialmente en bombeo, distribución, tratamiento de aguas residuales y manejo de lodos. El segundo consiste en aprovechar el potencial de recuperación energética asociado a los procesos de saneamiento. Esta doble agenda resulta particularmente relevante para América Latina y el Caribe, donde persisten brechas de cobertura, eficiencia operativa, tratamiento de aguas residuales y sostenibilidad financiera de los prestadores.

B. Consumo de energía del sector agua y saneamiento en América Latina y el Caribe

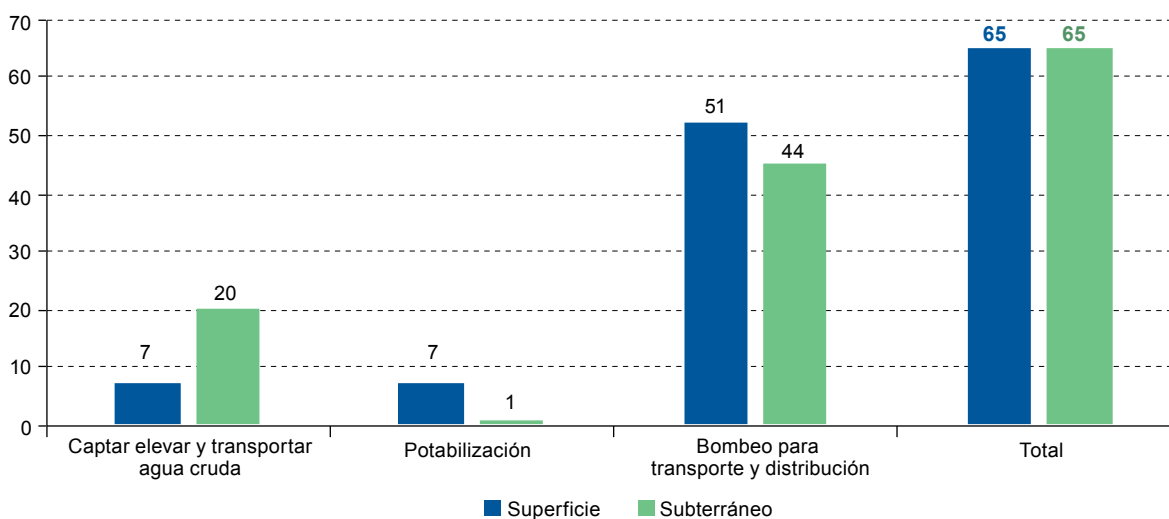
En América Latina y el Caribe, la gestión energética del sector de agua y saneamiento adquiere especial relevancia por las condiciones territoriales, operativas e institucionales en que se prestan los servicios. La topografía, la distancia entre las fuentes de abastecimiento y los centros de consumo, la dependencia de sistemas de bombeo, la antigüedad de la infraestructura, las pérdidas de agua, la baja automatización y las brechas de tratamiento de aguas residuales inciden directamente en los requerimientos energéticos de los prestadores.

El gráfico 4 resume cifras estimadas por la CEPAL (2015), que indican la distribución promedio del consumo de energía en el sector de agua potable y saneamiento en América Latina y el Caribe. Al igual que ocurre a nivel mundial, la mayor participación en el consumo de energía se presenta en las actividades de suministro de agua potable, con 65% del total, mientras que las actividades de saneamiento¹ representan el 35% restante.

Al profundizar el análisis del consumo de energía en el suministro de agua potable, se observa que, en el agregado, no se presenta una diferencia sustancial entre el suministro desde fuentes superficiales y el suministro desde fuentes subterráneas. Esto se explica porque los mayores consumos de energía que requiere la elevación de fuentes subterráneas son compensados por los mayores requerimientos de energía asociados al tratamiento de aguas superficiales.

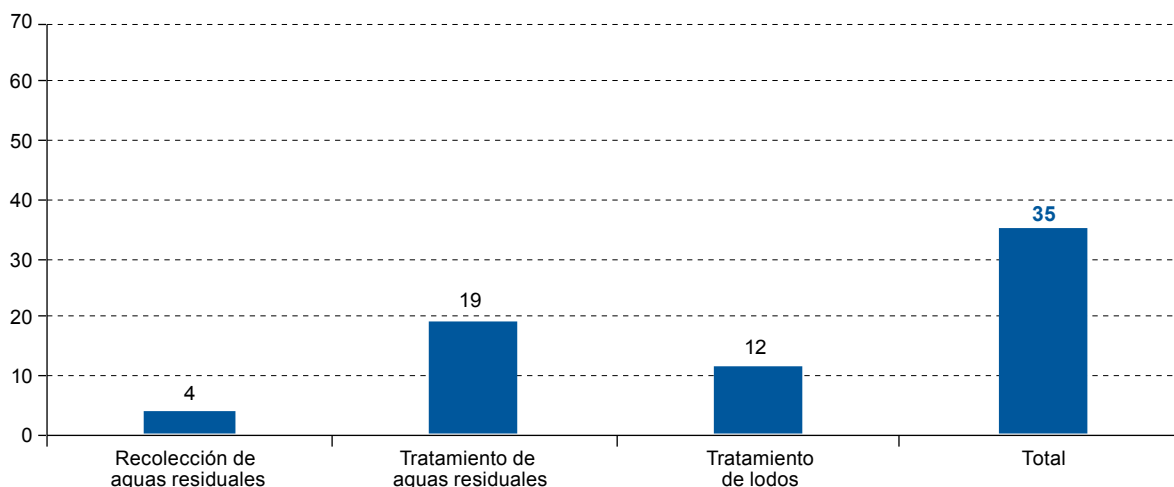
Gráfico 4
Distribución promedio del consumo de energía, sector de agua potable
y saneamiento³ (América Latina y el Caribe, 2015)
(En porcentajes)

A. Fase I: suministro (65% del total)



¹ Véase la definición operativa de saneamiento en el apartado II.D de este documento.

B. Fase II: saneamiento (35% del total)



Fuente: CEPAL (2015), WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos, 2014).

^a De acuerdo con el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP, 2014), la intensidad energética para obtener 1 m³ de agua puede variar desde 0,37 kWh en el caso de agua dulce superficial, hasta 8,5 kWh cuando se trata de aguas salobres o agua de mar. Esta variabilidad evidencia la importancia de analizar las condiciones específicas de cada sistema antes de definir medidas de eficiencia energética o recuperación de energía.

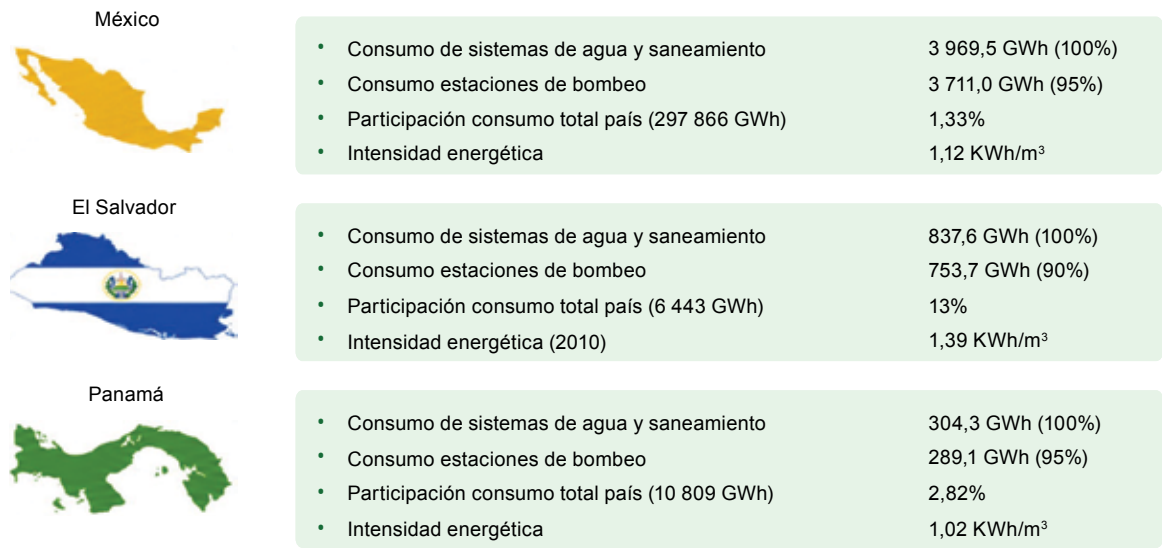
Al desagregar el consumo de energía por fases del suministro según tipo de fuente, la mayor participación se presenta en las actividades de bombeo para transporte y distribución. Estas representan 52% del total para aguas superficiales y 43% en promedio para aguas subterráneas. El consumo asociado con la captación, elevación y transporte de aguas crudas corresponde al 7% para aguas superficiales y al 20% para fuentes subterráneas. Finalmente, la potabilización consume en promedio el 7% del total de energía para el suministro de aguas superficiales y apenas el 1% para fuentes subterráneas.

En el caso del saneamiento, el tratamiento de las aguas residuales representa en promedio el 19% del consumo energético, seguido por el tratamiento de lodos, con 12%. Estos datos muestran que el saneamiento constituye un componente relevante de la demanda energética sectorial, pero también una fuente potencial de recuperación de energía. En particular, los procesos de tratamiento de aguas residuales y lodos pueden generar metano, que, bajo condiciones adecuadas de captura y aprovechamiento, puede transformarse en biogás para autoconsumo energético, reducción de costos y disminución de emisiones.

A escala nacional y con base en datos disponibles para 2015, el diagrama 2 presenta cifras de consumo e intensidad energética del sector agua y saneamiento para tres países de la región en 2019: México, El Salvador y Panamá. Se destaca el caso de El Salvador, donde la participación del sector de agua y saneamiento en el consumo total de energía del país asciende a cerca del 13%, cifra considerablemente superior a la participación estimada en Panamá, con 2,82% del total nacional, y México, con 1,33% del total nacional. Esta situación se explica por las condiciones particulares de topografía y prestación del servicio en zonas urbanas de El Salvador, que demandan de manera significativa procesos de bombeo de agua.

Las acciones orientadas a superar la obsolescencia de instalaciones eléctricas y la baja eficiencia de los sistemas de bombeo en América Latina y el Caribe ofrecen oportunidades importantes para reducir costos de operación, disminuir pérdidas de agua, postergar o priorizar nuevas inversiones de ampliación y reducir impactos ambientales a nivel local y global. Al aplicar opciones de mejoramiento de la eficiencia energética, se estima que es factible reducir entre el 20% y el 40% los costos de suministro de energía eléctrica (Liu, Ouedraogo, Manghee y Danilenko, 2012).

Diagrama 2
Consumo e intensidad energética del sector de agua potable y saneamiento en México, El Salvador y Panamá



Fuente: Datosmacro.com (2015).

No obstante, como se ha enfatizado previamente, los retos energéticos del sector no se limitan a la reducción del consumo actual. En la región, el aumento esperado de la cobertura de saneamiento y tratamiento de aguas residuales podría incrementar los requerimientos energéticos de los prestadores, especialmente cuando se incorporan procesos intensivos en bombeo, aireación y manejo de lodos. Por ello, resulta clave que la expansión del tratamiento incorpore desde el diseño criterios de eficiencia energética, optimización operativa y recuperación de recursos.

En este contexto, las auditorías energéticas se vuelven una herramienta clave para pasar del diagnóstico general a la identificación de oportunidades concretas. Permiten determinar dónde se concentran los consumos, qué procesos explican las principales ineficiencias, qué medidas pueden generar ahorros verificables y qué instalaciones presentan potencial para incorporar tecnologías eficientes, fuentes renovables o aprovechamiento energético del metano. El siguiente capítulo desarrolla esta herramienta como base para ordenar prioridades, sustentar inversiones y avanzar hacia una gestión energética integral del sector.

II. Auditorías energéticas como herramienta para la gestión energética integral

Este capítulo presenta una propuesta de protocolo para la realización de auditorías energéticas en empresas prestadoras de servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento en América Latina y el Caribe. Las auditorías energéticas se entienden como una herramienta de gestión que permite identificar, cuantificar y priorizar oportunidades para mejorar el desempeño energético de los sistemas, reducir costos operativos, disminuir emisiones y fortalecer la sostenibilidad ambiental y financiera de los prestadores.

En el marco de este documento, la auditoría energética no se limita a medir consumos eléctricos ni a detectar equipos ineficientes. Su propósito es más amplio: generar información técnica y económica para construir una cartera de medidas que combine eficiencia energética, optimización operativa, reducción de pérdidas, automatización, manejo de carga, incorporación de fuentes renovables y recuperación energética a partir de los propios procesos del sector. Esta mirada resulta especialmente relevante en sistemas de agua y saneamiento, donde la energía se utiliza de manera intensiva en bombeo, distribución, tratamiento, aireación y manejo de lodos, pero donde también existen oportunidades para recuperar recursos, en particular mediante el aprovechamiento del metano generado en el tratamiento de aguas residuales.

La región enfrenta desafíos específicos en términos de infraestructura, consumo energético y sostenibilidad. Muchos prestadores operan con equipos envejecidos, sistemas de bombeo sobredimensionados o subutilizados, información incompleta, pérdidas de agua significativas y bajos niveles de automatización. Al mismo tiempo, la expansión de la cobertura de saneamiento y tratamiento de aguas residuales puede incrementar los requerimientos energéticos si no incorpora desde el diseño criterios de eficiencia y recuperación de recursos. Por ello, las auditorías energéticas permiten pasar de diagnósticos generales a decisiones concretas de mejora, inversión y gestión.

Especial importancia tiene dentro de este documento la “Calculadora de Metano”, herramienta desarrollada por la CEPAL, de acceso libre, que permite estimar de manera preliminar el potencial de generación y aprovechamiento de metano en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Esta herramienta permite aproximar el potencial energético del biogás, los beneficios económicos asociados a la sustitución de energía, los costos de inversión y algunos indicadores básicos de viabilidad económica.

De esta manera, complementa el enfoque de auditoría energética al incorporar la recuperación de energía como parte de una estrategia integral para mejorar la eficiencia, reducir emisiones y valorizar recursos dentro del ciclo del saneamiento.

A. Objetivos de la auditoría energética

En términos generales, y de acuerdo con la Organización Internacional de Normalización (ISO) 50002, una auditoría energética comprende el análisis del desempeño energético de una organización, instalación, equipo, sistema o proceso. Este tipo de auditoría se soporta en la medición y análisis del uso de la energía, la eficiencia y el consumo energético, con el propósito de identificar oportunidades de mejora, reducir pérdidas de energía y generar beneficios económicos y ambientales.

Las auditorías energéticas se planifican y desarrollan como instrumentos técnicos para diagnosticar el estado del desempeño energético y priorizar medidas de mejora. Sus resultados incluyen información sobre los patrones de consumo, las condiciones de operación, los niveles de eficiencia y las oportunidades de optimización, así como recomendaciones priorizadas en función de su viabilidad técnica, económica y ambiental.

Un concepto relacionado, aunque distinto, es el de los sistemas de gestión de la energía. Estos sistemas constituyen una metodología de gestión basada en el ciclo de mejora continua —planear, hacer, verificar y actuar— orientada a mejorar de manera sistemática el desempeño energético de una organización. Mientras que la auditoría energética permite identificar y evaluar oportunidades específicas de mejora, el sistema de gestión de la energía establece un marco permanente para gestionar, monitorear y mejorar el desempeño energético en el tiempo.

Para el caso de organizaciones o prestadores encargados de servicios y actividades del sector de agua y saneamiento, las auditorías energéticas persiguen dos grupos de objetivos interrelacionados, el primer grupo está orientados a la eficiencia energética:

- reducir el consumo de energía en instalaciones y procesos operativos;
- mejorar la eficiencia energética en los sistemas de captación, tratamiento y distribución de agua potable, y en la gestión de aguas residuales;
- identificar los puntos críticos de ineficiencia y proponer medidas técnica y económicamente viables; y
- facilitar el cumplimiento de la normativa ambiental y de eficiencia energética aplicable.

Y el segundo grupo de objetivos a la gestión energética integral. Estos objetivos se amplían para incorporar también la identificación de oportunidades de recuperación y generación de energía dentro de los propios sistemas de agua y saneamiento. Por lo cual, sus objetivos están orientados a la recuperación y valorización energética:

- evaluar el potencial de aprovechamiento energético del metano generado en el tratamiento de aguas residuales;
- identificar oportunidades de autoconsumo a partir de fuentes renovables;
- estimar la reducción de emisiones asociada al aprovechamiento de subproductos del saneamiento bajo un enfoque de economía circular; y
- contribuir a la sostenibilidad financiera de los prestadores mediante la valorización de recursos dentro del ciclo del agua.

De esta manera, la auditoría energética no solo permite conocer cuánto y dónde se consume energía, sino que, combinadas con las estrategias de gestión energética determinan qué medidas pueden convertirse en proyectos de inversión con beneficios verificables. Al estimar ahorros potenciales, costos de implementación, períodos de recuperación, reducción de emisiones y oportunidades de recuperación energética, la auditoría contribuye a transformar información técnica en decisiones de gestión, regulación y financiamiento para los prestadores.

B. Normas y referentes internacionales

La gestión y las auditorías energéticas cuentan con normas y referentes internacionales que permiten ordenar metodologías, criterios técnicos, responsabilidades, etapas de trabajo y entregables. En particular, la Organización Internacional de Normalización—conocida por sus siglas en inglés como ISO— ha desarrollado una familia de normas técnicas relacionadas con la gestión, evaluación y mejora del desempeño energético, entre las cuales se destacan la ISO 50001 y la ISO 50002.

La norma ISO 50001 establece los requisitos para implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión de la energía en una organización. Su propósito es promover la mejora continua del desempeño energético mediante un enfoque sistemático orientado al uso eficiente de la energía, la reducción del consumo energético, el fortalecimiento de la gestión institucional y la disminución de costos e impactos ambientales asociados.

Por su parte, la norma ISO 50002 está específicamente orientada a las auditorías energéticas. Esta norma define requisitos mínimos y orientaciones para planificar, ejecutar y reportar auditorías energéticas, con el fin de identificar oportunidades de mejora en el desempeño energético de instalaciones, procesos, equipos o sistemas. Su aplicación permite armonizar criterios, aumentar la transparencia del proceso y facilitar que los resultados de la auditoría sean comparables, verificables y útiles para la toma de decisiones.

En el sector de agua y saneamiento, estos referentes resultan especialmente relevantes porque permiten estructurar diagnósticos energéticos en sistemas complejos, con múltiples instalaciones, procesos y fuentes de consumo. Las normas ayudan a definir el alcance de la auditoría, establecer límites del sistema, recopilar información, identificar indicadores de desempeño energético, analizar consumos, evaluar pérdidas y priorizar medidas de mejora. También permiten vincular la auditoría con planes de acción, seguimiento de resultados y procesos de mejora continua.

1. Norma ISO 50001: sistemas de gestión de la energía

La norma ISO 50001 proporciona un marco para que las organizaciones establezcan una política energética, definan objetivos y metas, construyan líneas de base, identifiquen indicadores de desempeño energético y desarrollen planes de acción para mejorar de manera continua su desempeño energético. Su aplicación es voluntaria y puede adaptarse a organizaciones de distinto tamaño, sector o ubicación geográfica.

Esta norma se basa en el ciclo de mejora continua Planificar-Hacer-Verificar-Actuar. En el contexto de la gestión energética, este ciclo implica: i) planificar, mediante la revisión energética, la definición de la línea de base, los indicadores de desempeño energético, los objetivos, las metas y los planes de acción; ii) hacer, mediante la implementación de dichos planes; iii) verificar, mediante el seguimiento y medición de los procesos y variables que determinan el desempeño energético; y iv) actuar, mediante la adopción de medidas correctivas y de mejora continua.

Para los prestadores de servicios de agua y saneamiento, la ISO 50001 puede contribuir a institucionalizar la gestión energética más allá de intervenciones puntuales. Esto es particularmente importante en sistemas donde el consumo de energía depende de decisiones operativas cotidianas, tales como horarios de bombeo, presión en redes, operación de estaciones elevadoras, aireación en plantas

de tratamiento, manejo de lodos, mantenimiento de motores y uso de sistemas de automatización. Bajo este enfoque, la gestión energética deja de ser una acción aislada y se transforma en parte de la operación regular del prestador.

La norma no establece metas cuantitativas universales de desempeño energético, sino que cada organización define sus propios objetivos en función de su política energética, requisitos legales, condiciones operativas, disponibilidad de información y recursos. Esto permite que prestadores con características diferentes puedan aplicar el mismo marco de gestión, aun cuando sus consumos, tecnologías, costos y posibilidades de mejora sean distintos.

Asimismo, la ISO 50001 puede integrarse con otros sistemas de gestión, incluidos los relacionados con calidad, medio ambiente, seguridad y salud ocupacional. Esta posibilidad es relevante para empresas de agua y saneamiento que buscan articular la eficiencia energética con metas más amplias de sostenibilidad ambiental, reducción de emisiones, gestión de activos, eficiencia operativa y economía circular.

2. Norma ISO 50002: auditorías energéticas

La norma ISO 50002 define principios, requisitos y orientaciones para realizar auditorías energéticas. Una auditoría energética comprende el análisis sistemático del uso y consumo de energía de una organización, instalación, equipo, sistema o proceso, con el fin de identificar, cuantificar e informar oportunidades de mejora en el desempeño energético.

A diferencia de la ISO 50001, que establece un marco permanente de gestión, la ISO 50002 se enfoca en el proceso específico de auditoría. Sus orientaciones permiten definir el alcance y los límites de la auditoría, acordar objetivos, recopilar y analizar información, realizar mediciones, evaluar usos significativos de energía, identificar oportunidades de mejora y presentar resultados mediante informes técnicos útiles para la toma de decisiones.

La auditoría energética puede servir como insumo para implementar o fortalecer un sistema de gestión de la energía, pero también puede desarrollarse de manera independiente. En ambos casos, su valor radica en generar evidencia sobre el desempeño energético real de los sistemas y en traducir esa evidencia en medidas priorizadas según criterios técnicos, económicos y ambientales.

En el sector de agua y saneamiento, la aplicación de la ISO 50002 permite ordenar el análisis de instalaciones y procesos intensivos en energía, como sistemas de captación, estaciones de bombeo, plantas de tratamiento de agua potable, redes de distribución, sistemas de recolección, plantas de tratamiento de aguas residuales y manejo de lodos. También permite identificar oportunidades asociadas con automatización, manejo de carga, sustitución de equipos, reducción de pérdidas, incorporación de fuentes renovables y aprovechamiento energético del metano.

De esta manera, las normas ISO 50001 e ISO 50002 ofrecen un marco complementario para avanzar hacia una gestión energética integral. La primera permite organizar la mejora continua del desempeño energético en el tiempo; la segunda permite realizar diagnósticos específicos y priorizar acciones. En conjunto, ambas contribuyen a que los prestadores de agua y saneamiento pasen de mediciones aisladas de consumo a estrategias estructuradas de eficiencia, recuperación energética, reducción de emisiones y sostenibilidad financiera.

C. Alcance del protocolo de auditoría energética

El protocolo propuesto en este documento aplica a instalaciones, procesos y equipos asociados con la prestación de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Comprende las actividades de captación, elevación, tratamiento, transporte y distribución de agua potable, así como la recolección, tratamiento y disposición final de aguas residuales municipales y lodos. También puede incluir oficinas o

sedes administrativas, plantas de tratamiento de agua potable, plantas de tratamiento de aguas residuales, redes de distribución, redes de recolección, estaciones de bombeo, sistemas eléctricos, sistemas de control, equipos electromecánicos e infraestructura auxiliar.

El alcance específico de cada auditoría debe definirse en función de los objetivos del prestador, la disponibilidad de información, la escala del sistema, los procesos incluidos, las instalaciones priorizadas y los recursos técnicos y financieros disponibles. La auditoría puede tener un alcance integral, cuando abarca el conjunto de operaciones del prestador, o un alcance focalizado, cuando se concentra en instalaciones, procesos o localidades específicas, por ejemplo, estaciones de bombeo, plantas de tratamiento, sistemas de aireación, redes con altos niveles de pérdida o unidades de manejo de lodos.

Las oportunidades de mejora identificadas mediante el protocolo pueden organizarse en tres grandes grupos. El primero corresponde a medidas de eficiencia energética y optimización operativa, tales como ajustes en horarios de bombeo, manejo de carga, mantenimiento preventivo, reducción de pérdidas hidráulicas, mejoras en aireación, automatización y uso de sistemas de control. El segundo corresponde a inversiones en tecnologías más eficientes, incluyendo sustitución de bombas y motores, instalación de variadores de frecuencia, mejora de instalaciones eléctricas, modernización de equipos y sistemas de medición. El tercero corresponde a medidas de recuperación o generación de energía, entre ellas la incorporación de fuentes renovables y el aprovechamiento energético del metano generado en el tratamiento de aguas residuales. Como se muestra en el diagrama 3, estas medidas pueden combinar acciones de planificación y operación con inversiones tecnológicas orientadas a reducir el consumo energético, mejorar el desempeño operativo y recuperar energía dentro del propio ciclo del agua.

Diagrama 3
Resumen de principales medidas de eficiencia energética y recuperación de energía
en el sector de agua y saneamiento



Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, el protocolo no se limita a identificar consumos excesivos o pérdidas de energía. Su alcance permite construir una hoja de ruta para la gestión energética integral del prestador, combinando medidas operativas de corto plazo, inversiones tecnológicas, mejora de información, reducción de emisiones y valorización de recursos dentro del ciclo del agua. En particular, la inclusión del aprovechamiento de metano permite vincular la auditoría energética con estrategias de economía circular, sostenibilidad financiera y transición energética.

En este contexto, las auditorías energéticas constituyen una herramienta de planificación y toma de decisiones. Sus resultados permiten priorizar intervenciones según criterios técnicos, económicos y ambientales; estimar ahorros potenciales; identificar necesidades de inversión; evaluar períodos de recuperación; y orientar la implementación de medidas verificables. Así, el protocolo contribuye a pasar de diagnósticos generales sobre consumo energético a carteras concretas de proyectos de eficiencia, recuperación energética y mejora operativa.

D. Definiciones

Para los fines del presente protocolo se adoptan las siguientes definiciones:

Auditoría energética: proceso sistemático que incluye la recolección de datos, el análisis y la evaluación de los usos y consumos de energía, con el fin de identificar, cuantificar e informar oportunidades para mejorar el desempeño energético. De acuerdo con la ISO, una auditoría energética corresponde al análisis sistemático del uso y consumo de energía para identificar oportunidades de mejora.

Alcance de la auditoría energética: delimitación de los usos de la energía, actividades, procesos, instalaciones, equipos o sistemas que serán incluidos en la auditoría energética. El alcance debe ser definido por la organización en consulta con el auditor energético y puede incluir uno o más límites físicos, operativos u organizacionales.

Auditor energético: persona o equipo de personas responsables de planificar, ejecutar y reportar una auditoría energética.

Balance energético: cuantificación de las entradas, generación, transformación, almacenamiento, uso y salidas de energía dentro de un límite definido. El balance energético permite comparar la energía que ingresa al sistema con la energía utilizada, transformada, recuperada o perdida en los distintos procesos.

Biogás: mezcla de gases generada durante la descomposición anaerobia de materia orgánica, como la contenida en aguas residuales o lodos. Está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, y puede ser aprovechado para generar energía eléctrica o térmica bajo condiciones técnicas adecuadas.

Condensador eléctrico: dispositivo eléctrico que almacena carga eléctrica. En sistemas de bombeo de acueducto o saneamiento puede utilizarse para mejorar el desempeño eléctrico de motores asociados a bombas de agua.

Consumo de energía: cantidad de energía utilizada por una organización, instalación, proceso, equipo o sistema durante un período determinado.

Desempeño energético: resultados medibles relacionados con la eficiencia energética, el uso de la energía y el consumo de energía.

Eficiencia energética: relación entre la energía utilizada y el resultado obtenido en términos de bienes, servicios, procesos o desempeño. En el sector de agua y saneamiento puede expresarse, por ejemplo, como energía consumida por metro cúbico de agua producida, transportada, distribuida o tratada.

Factor de carga: relación entre la energía realmente utilizada por un equipo o sistema y su capacidad nominal durante un período determinado.

Flujo energético: descripción o mapeo de los procesos de transferencia, transformación, uso, pérdida o recuperación de energía dentro del alcance de la auditoría energética.

Indicador de desempeño energético: valor cuantitativo o medida del desempeño energético definido por la organización. Puede utilizarse para monitorear consumos, comparar procesos, establecer líneas de base y evaluar mejoras en el tiempo.

Límite: frontera física, operativa u organizacional definida para una auditoría energética o para un sistema de gestión de la energía. Puede corresponder, por ejemplo, a una instalación completa, una planta de tratamiento, una estación de bombeo, una red de distribución, una unidad de manejo de lodos o un conjunto de procesos bajo control del prestador.

Metano: gas de efecto invernadero generado, entre otros procesos, durante la degradación anaerobia de materia orgánica presente en aguas residuales y lodos. Cuando se libera a la atmósfera constituye un pasivo ambiental y climático; cuando se captura y aprovecha puede utilizarse como componente energético del biogás.

Recuperación energética: aprovechamiento de energía contenida o generada en los propios procesos del sistema de agua y saneamiento. Puede incluir, entre otros, el aprovechamiento del metano generado en el tratamiento de aguas residuales, el uso de biogás para generación eléctrica o térmica, y otras alternativas de valorización energética de subproductos.

Saneamiento: en el marco de este documento, el término saneamiento comprende el conjunto de actividades e infraestructuras destinadas a la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de las aguas residuales, así como el manejo y aprovechamiento de los lodos generados en dichos procesos. Esta definición incluye las redes de alcantarillado, las estaciones de bombeo de aguas residuales y las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), pero excluye los sistemas de abastecimiento y distribución de agua potable, que se analizan de forma separada bajo el componente de suministro de agua.

Uso de la energía: forma o tipo de aplicación de la energía en una organización, instalación, proceso, equipo o sistema. En agua y saneamiento puede incluir bombeo, aireación, iluminación, tratamiento, deshidratación de lodos, climatización, control operativo o generación de energía.

Variadores de frecuencia: dispositivos electrónicos utilizados para controlar la velocidad de motores eléctricos. En sistemas de agua y saneamiento se emplean principalmente en equipos de bombeo para ajustar la operación a los requerimientos de caudal o presión, reduciendo consumos energéticos y desgaste de equipos.

Variable pertinente: parámetro cuantificable que impacta en el consumo o desempeño energético. Puede incluir caudal, presión, altura de bombeo, temperatura, carga orgánica, volumen tratado, horas de operación, nivel de tanques, demanda del sistema o características de los equipos.

E. Fases del proceso de auditoría energética

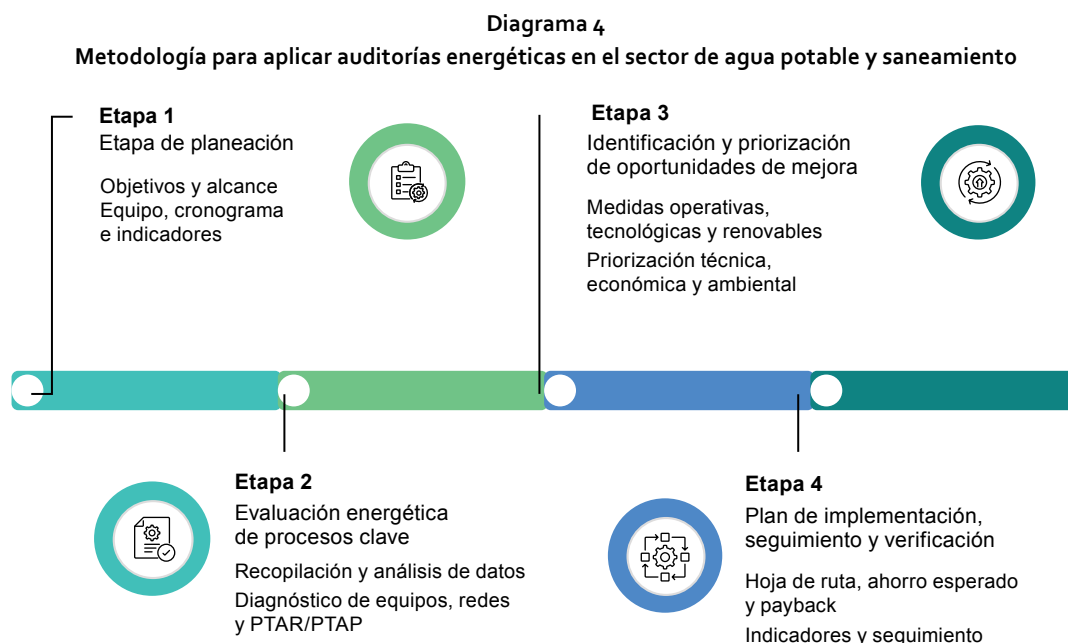
La metodología para aplicar auditorías energéticas en organizaciones del sector de agua y saneamiento debe permitir pasar de la caracterización del consumo energético a la identificación, priorización e implementación de oportunidades de mejora. En este sentido, la auditoría no se limita a revisar facturas eléctricas o medir el desempeño de equipos específicos, sino que analiza de manera integral los procesos, instalaciones y decisiones operativas que determinan el uso de la energía.

En términos generales, el proceso de auditoría energética comprende cuatro fases principales: i) planeación de la auditoría; ii) evaluación energética de procesos clave; iii) identificación y priorización de oportunidades de mejora; y iv) definición de un plan de implementación, seguimiento y verificación. Estas fases permiten ordenar la información disponible, identificar pérdidas o ineficiencias, estimar ahorros potenciales, evaluar inversiones requeridas y reconocer oportunidades de recuperación o generación de energía dentro del propio sistema.

En sistemas de agua y saneamiento, la auditoría debe prestar especial atención a los procesos con mayor consumo energético, tales como captación, bombeo, transporte, distribución, tratamiento de agua potable, recolección de aguas residuales, aireación, tratamiento de aguas residuales y manejo de lodos.

Asimismo, debe considerar oportunidades vinculadas con automatización, manejo de carga, mejora de equipos, incorporación de fuentes renovables y aprovechamiento energético del metano generado en el tratamiento de aguas residuales.

Como se resume en el diagrama 4, la auditoría energética permite estructurar una secuencia de trabajo que parte de la recopilación de información preliminar y la definición de objetivos, avanza hacia la evaluación energética de procesos clave, identifica oportunidades de mejora y culmina con la formulación de un plan de implementación y retorno de inversión.



Fuente: Elaboración propia.

1. Fase 1: Planeación de la auditoría

Durante el período de planeación se definen los objetivos específicos, el alcance de la auditoría, el equipo de trabajo, el cronograma y los indicadores clave que permitirán evaluar el desempeño energético. Esta fase es fundamental para asegurar que la auditoría responda a las prioridades del prestador y genere resultados útiles para la toma de decisiones.

En primer lugar, se deben definir los objetivos de la auditoría. Estos pueden incluir la reducción del consumo de energía, la disminución de costos operativos, la identificación de puntos críticos de ineficiencia, la evaluación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la incorporación de tecnologías limpias o la identificación de oportunidades de recuperación energética. En esta fase es importante precisar si la auditoría busca alcanzar una meta específica de reducción de consumo, mejorar la eficiencia de determinados procesos, evaluar alternativas de inversión o construir una cartera más amplia de medidas de gestión energética.

En segundo lugar, se debe delimitar el alcance de la auditoría. Este puede abarcar toda la empresa y sus instalaciones, o concentrarse en procesos, localidades o activos específicos, tales como plantas de tratamiento de agua potable, estaciones de bombeo, redes de distribución, plantas de tratamiento de aguas residuales, sistemas de aireación, unidades de manejo de lodos o instalaciones administrativas. La definición del alcance debe considerar la disponibilidad de información, la relevancia energética de cada proceso, el potencial de mejora y los recursos disponibles para realizar la auditoría.

En tercer lugar, se debe conformar el equipo de auditoría. Es recomendable incluir personal técnico con conocimiento en energía, especialistas en los procesos operativos del prestador, personal local de operación y mantenimiento, analistas económicos y representantes de las áreas de sostenibilidad o planificación. Esta composición permite combinar conocimiento técnico especializado con información práctica sobre la operación cotidiana de los sistemas.

En cuarto lugar, se debe establecer un cronograma de trabajo que ordene las actividades de recopilación de información, visitas técnicas, mediciones, análisis, identificación de oportunidades, evaluación económica y preparación del informe final. El cronograma debe ser realista y considerar la disponibilidad del personal operativo, el acceso a instalaciones, la instalación temporal de equipos de medición cuando corresponda y los tiempos requeridos para validar la información.

Finalmente, se deben definir los indicadores clave que permitirán evaluar la eficiencia energética. Estos pueden incluir, entre otros, consumo de energía por metro cúbico de agua producida, bombeada, distribuida o tratada; consumo por estación de bombeo; consumo por proceso de tratamiento; costo de energía por unidad de servicio; factor de carga; eficiencia de bombas y motores; consumo asociado a aireación; energía generada o recuperada; emisiones evitadas; ahorro económico esperado; inversión requerida; y período de recuperación de la inversión.

2. Fase 2: Evaluación energética de procesos clave

La evaluación energética de procesos clave constituye el núcleo técnico de la auditoría. Su propósito es identificar cómo, dónde y por qué se consume energía dentro de los sistemas de agua y saneamiento, así como determinar las principales pérdidas, ineficiencias y oportunidades de mejora. Esta fase permite pasar de una revisión general de consumos a un análisis más detallado por instalación, proceso, equipo y condición operativa.

En los sistemas de abastecimiento de agua potable, la evaluación debe considerar los procesos de captación, elevación, transporte, potabilización, almacenamiento y distribución. En los sistemas de saneamiento, debe incluir la recolección, bombeo, tratamiento de aguas residuales, aireación, recirculación, manejo de lodos, disposición final y, cuando corresponda, procesos de digestión anaerobia o generación de biogás. Esta mirada integral permite identificar tanto oportunidades de reducción del consumo energético como posibilidades de recuperación o generación de energía dentro del propio sistema.

La evaluación energética debe considerar las condiciones particulares de cada prestador. La fuente de abastecimiento, la topografía, la distancia entre la fuente y los centros de consumo, la profundidad de captación, el estado de las redes, los niveles de pérdidas de agua, la tecnología de tratamiento, la antigüedad de los equipos y los patrones de operación inciden directamente en el desempeño energético. Por ello, los resultados de la auditoría deben interpretarse a partir del contexto operativo específico de cada sistema.

a) Recopilación de datos e información clave

La recopilación de información es una fase crítica para asegurar la calidad de la auditoría energética. Antes de iniciar el análisis, se deben identificar los principales procesos que demandan energía en los sistemas de abastecimiento y saneamiento: i) captación, elevación, potabilización, transporte y distribución de agua potable; y ii) recolección, bombeo, tratamiento y descarga de aguas residuales, incluyendo el manejo de lodos.

Asimismo, se deben considerar las características de las fuentes de suministro de agua utilizadas por el prestador, ya sean superficiales, subterráneas, salobres, salinas o recicladas. La intensidad energética puede variar significativamente según el tipo de fuente, la distancia entre la captación y las instalaciones de tratamiento, la profundidad de extracción, las necesidades de elevación, la topografía y las condiciones de operación de las redes de distribución y recolección.

La recopilación de información debe priorizar, al menos, los siguientes grupos de datos:

i) Datos operacionales y de consumo energético

Se debe recopilar información histórica sobre consumo de energía, idealmente para un período de entre 12 y 24 meses. Esta información debe incluir facturas del servicio eléctrico, tarifas aplicadas, demanda contratada, horarios de consumo, cargos por potencia, penalizaciones, registros internos y, cuando sea posible, datos desagregados por zona, instalación, proceso, equipo o servicio.

También se recomienda establecer curvas de carga diaria, mensual y anual para las principales instalaciones del prestador, especialmente estaciones de bombeo, plantas de tratamiento de agua potable, plantas de tratamiento de aguas residuales y sistemas de aireación. Estas curvas permiten identificar horarios de mayor demanda, posibles sobrecostos por consumo en horas punta, variaciones estacionales y oportunidades de manejo de carga.

ii) Inventario e inspección de equipos y procesos

Se deben realizar visitas técnicas a las instalaciones del prestador para identificar los procesos, equipos e instalaciones asociados con los mayores consumos energéticos. Esto incluye sistemas de bombeo, motores eléctricos, tableros, transformadores, sistemas de aireación, sopladores, equipos de recirculación, sistemas de deshidratación de lodos, equipos de climatización, iluminación, sistemas de control y otros componentes electromecánicos.

El inventario debe registrar la antigüedad, tipo, capacidad, estado físico, condiciones de operación y mantenimiento de los equipos. En particular, se debe verificar si existen bombas o motores sobredimensionados, equipos operando fuera de sus rangos óptimos, sistemas con baja eficiencia electromecánica, falta de mantenimiento preventivo o ausencia de medición adecuada.

iii) Información hidráulica y operativa

La auditoría debe recopilar información sobre caudales captados, producidos, bombeados, distribuidos, recolectados y tratados; presiones de operación; alturas de bombeo; niveles de tanques; pérdidas de agua; horas de operación de equipos; continuidad del servicio; y condiciones de operación de redes. Esta información es indispensable para relacionar el consumo energético con el desempeño hidráulico del sistema.

En redes de distribución y recolección, se deben identificar zonas con pérdidas elevadas, presiones inadecuadas, fugas recurrentes, obstrucciones, bombeos innecesarios o condiciones que generen consumos energéticos superiores a los requeridos. En plantas de tratamiento, se debe revisar la relación entre energía consumida, caudal tratado, carga contaminante removida y eficiencia del proceso.

iv) Información sobre tratamiento de aguas residuales, lodos y potencial de recuperación energética

Cuando la auditoría incluya instalaciones de tratamiento de aguas residuales, se debe recopilar información específica sobre caudales tratados, tipo de tecnología, carga orgánica, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, remoción de contaminantes, producción de lodos, existencia de digestión anaerobia, manejo de biogás, quemadores, sistemas de captura, generación eléctrica o térmica, y condiciones de disposición final.

Esta información es necesaria para estimar el potencial de recuperación energética, especialmente mediante el aprovechamiento del metano generado en el tratamiento de aguas residuales y lodos. Cuando existan datos suficientes, estos podrán alimentar herramientas de estimación preliminar, como la Calculadora de Metano de la CEPAL, con el fin de aproximar el potencial de generación de biogás, energía recuperable, ahorros económicos, inversión requerida y reducción de emisiones.

v) Infraestructura eléctrica e instrumentación de medición

Se deben revisar las condiciones de las instalaciones eléctricas, tableros, transformadores, conductores, protecciones, sistemas de puesta a tierra, bancos de condensadores y equipos de medición. También se debe verificar el correcto funcionamiento de medidores de caudal, presión, energía, temperatura y otras variables relevantes.

Cuando la información disponible sea insuficiente, se recomienda utilizar instrumentación temporal, como analizadores de energía, caudalímetros, sensores de presión, termómetros u otros equipos de medición, para registrar variables críticas en tiempo real. La calidad de la auditoría dependerá en gran medida de la disponibilidad, precisión y consistencia de la información recolectada.

b) Análisis de la información

Con base en la información recopilada, la auditoría debe analizar el desempeño energético de las instalaciones, procesos y equipos incluidos en el alcance definido. Acá se busca transformar los datos operativos, energéticos, hidráulicos y financieros en evidencia útil para identificar ineficiencias, pérdidas, oportunidades de optimización y alternativas de recuperación energética.

El análisis debe considerar, al menos, los siguientes componentes:

i) Análisis de la eficiencia energética de los equipos

Se debe calcular el rendimiento de los principales equipos consumidores de energía y compararlo con estándares técnicos, valores de referencia del sector o condiciones óptimas de operación. Este análisis debe incluir, entre otros, bombas, motores, sopladores, sistemas de aireación, equipos de recirculación, sistemas de deshidratación de lodos, tableros eléctricos y equipos auxiliares.

En particular, se debe determinar si existen bombas o motores sobredimensionados, subutilizados, operando fuera de su punto de máxima eficiencia o con bajos niveles de eficiencia electromecánica. También se debe evaluar la necesidad de modernización tecnológica, incluyendo sustitución de equipos, instalación de variadores de frecuencia, mejora de sistemas de control, optimización de aireación o adecuación de la infraestructura eléctrica.

ii) Análisis de consumos, costos y patrones de operación

La auditoría debe analizar la relación entre energía consumida, caudal producido, bombeado, distribuido o tratado, así como los costos asociados a cada proceso o instalación. Esto permite identificar activos o procesos con consumos desproporcionados, variaciones estacionales, sobrecostos tarifarios, penalizaciones por demanda, operación en horarios de mayor costo o baja correspondencia entre consumo energético y producción efectiva del servicio.

Este análisis debe permitir construir indicadores como kWh por metro cúbico de agua producida, bombeada, distribuida o tratada; costo energético por metro cúbico; consumo por estación de bombeo; consumo por unidad de carga contaminante removida; consumo por sistema de aireación; y consumo energético por etapa del tratamiento. Estos indicadores son fundamentales para comparar instalaciones, identificar brechas de desempeño y establecer líneas de base para el seguimiento posterior.

iii) Identificación de pérdidas energéticas e ineficiencias operativas

Se deben localizar pérdidas asociadas a fugas en tuberías, redes con altos niveles de agua no contabilizada, bombas en mal estado, tuberías con elevada pérdida de carga, válvulas u otros accesorios que generen restricciones innecesarias, sistemas de presión mal regulados o estaciones de bombeo operando por encima de los requerimientos reales del sistema.

También deben identificarse pérdidas o desperdicios de energía asociados a fallas de aislamiento, deficiencias en instalaciones eléctricas, bajo factor de potencia, equipos sin mantenimiento, arranques y paradas frecuentes, operación simultánea innecesaria de equipos, ausencia de control automático o funcionamiento de sistemas de aireación sin correspondencia con la carga real del proceso.

iv) Evaluación de sistemas de automatización, medición y control

La auditoría debe revisar el nivel de automatización existente y la disponibilidad de información en tiempo real para la operación del sistema. Esto incluye sistemas de supervisión, control y adquisición de datos, sensores de presión, caudalímetros, medidores de energía, analizadores de calidad de agua, medición de niveles en tanques y otros instrumentos que permitan operar de manera más eficiente.

La implementación o mejora de sistemas de automatización puede contribuir a ajustar la operación de bombas, aireadores y otros equipos a la demanda real del sistema, reducir consumos innecesarios, mejorar la continuidad del servicio, detectar fugas o fallas tempranamente y optimizar la toma de decisiones. En este sentido, el análisis debe identificar tanto brechas de medición como oportunidades para mejorar la gestión de datos y el control operativo.

v) Evaluación del potencial de recuperación o generación de energía

Cuando el alcance de la auditoría incluya plantas de tratamiento de aguas residuales o procesos de manejo de lodos, el análisis debe evaluar si existen condiciones para recuperar energía a partir de los propios procesos del saneamiento. En particular, debe revisarse el potencial de captura y aprovechamiento del metano generado en procesos anaerobios, el uso actual o potencial del biogás, las posibilidades de generación eléctrica o térmica, y las condiciones para autoconsumo energético dentro de la instalación.

Este análisis debe considerar la disponibilidad de caudal tratado, carga orgánica, producción de lodos, tecnología de tratamiento, existencia de digestión anaerobia, infraestructura de captura, quema o aprovechamiento de biogás, demanda energética de la planta y posibles excedentes. Cuando la información lo permita, se recomienda realizar estimaciones preliminares de energía recuperable, reducción de emisiones, ahorro económico, inversión requerida y período de recuperación.

vi) Evaluación preliminar de viabilidad técnica, económica y ambiental

Las oportunidades identificadas deben evaluarse de manera preliminar con criterios técnicos, económicos y ambientales. Esto implica estimar los ahorros potenciales, costos de implementación, reducción de emisiones, complejidad operativa, necesidades de mantenimiento, vida útil esperada, riesgos de implementación y beneficios asociados a la mejora del desempeño del sistema.

El resultado de esta etapa debe permitir distinguir entre medidas de rápida implementación y bajo costo, inversiones tecnológicas de mediano plazo y proyectos de mayor escala asociados a recuperación energética o incorporación de fuentes renovables. Esta clasificación facilita la priorización posterior y contribuye a construir una cartera de acciones coherente con la capacidad técnica y financiera del prestador.

c) Tipos de pérdidas de energía y puntos críticos de intervención

A partir del balance energético del sistema es posible identificar distintos tipos de pérdidas de energía que afectan el desempeño de los servicios de agua y saneamiento. En términos generales, estas pérdidas pueden agruparse en tres categorías principales: pérdidas eléctricas, pérdidas mecánicas y pérdidas hidráulicas.

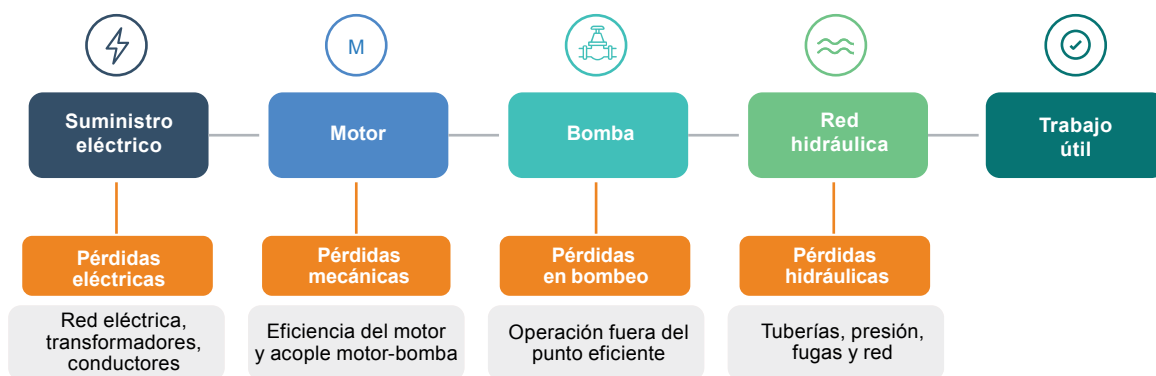
Las **pérdidas eléctricas** se producen en el suministro, transformación y conducción de la energía eléctrica hasta los equipos consumidores, especialmente motores. Pueden estar asociadas a transformadores ineficientes, conductores en mal estado, bajo factor de potencia, instalaciones eléctricas obsoletas, sobrecargas, conexiones deficientes o ausencia de sistemas adecuados de medición y control.

Las **pérdidas mecánicas** se relacionan con la transferencia de energía desde los motores hacia los equipos accionados, como bombas, sopladores o sistemas de aireación. Estas pérdidas pueden originarse en motores de baja eficiencia, acoplamientos defectuosos, desgaste de componentes, falta de mantenimiento, desalineación, fricción excesiva o equipos operando fuera de sus rangos óptimos.

Las **pérdidas hidráulicas** corresponden a la energía que se pierde durante la conducción, elevación, distribución o recolección del agua. Incluyen pérdidas de carga en tuberías, accesorios, válvulas, bombas, redes de distribución o recolección, así como pérdidas asociadas a fugas, presiones inadecuadas, obstrucciones, diseños hidráulicos deficientes o equipos sobredimensionados. En sistemas de agua potable, estas pérdidas pueden traducirse en mayor consumo de bombeo; en sistemas de saneamiento, pueden incrementar los requerimientos energéticos de estaciones elevadoras, recirculaciones o procesos de tratamiento.

El diagrama 5 presenta un esquema general de secuencia energética y balance de energía para un sistema típico de suministro de agua. Este esquema permite identificar los puntos donde se producen pérdidas desde el suministro eléctrico hasta la entrega hidráulica del servicio. En particular, permite observar pérdidas en la red eléctrica, transformadores, conductores, motores, bombas, tuberías, redes, tanques y eventuales fugas.

Diagrama 5
Esquema general de secuencia energética y balance de energía para un sistema de suministro de agua



Fuente: Adaptado del Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2011).

Como se observa en el esquema, las pérdidas no se concentran en un único punto del sistema, sino que pueden acumularse a lo largo de toda la cadena energética e hidráulica. Por ello, una auditoría energética debe analizar cada etapa de manera sistemática: desde la calidad del suministro eléctrico y el estado de los motores, hasta la eficiencia de las bombas, las condiciones hidráulicas de las redes y la existencia de pérdidas físicas de agua.

La identificación de estos puntos críticos permite orientar las medidas de mejora. Algunas intervenciones pueden ser de carácter operativo, como ajustar horarios de bombeo, regular presiones o mejorar rutinas de mantenimiento. Otras pueden requerir inversiones, como sustituir motores, instalar variadores de frecuencia, renovar bombas, mejorar instalaciones eléctricas, sectorizar redes o incorporar sistemas de medición y control. En todos los casos, la evaluación debe considerar la relación beneficio/costo, el ahorro energético esperado, la reducción de pérdidas y los impactos sobre la continuidad y calidad del servicio.

En el caso de las plantas de tratamiento de aguas residuales, el análisis de pérdidas debe complementarse con la evaluación de oportunidades de recuperación energética. Esto implica revisar no solo dónde se pierde energía, sino también dónde existen subproductos o procesos —como el tratamiento de lodos o la digestión anaerobia— que pueden generar biogás y contribuir al autoconsumo energético de la instalación.

d) Factores que afectan las pérdidas de energía

Las pérdidas de energía en los sistemas de agua y saneamiento dependen de una combinación de factores físicos, hidráulicos, eléctricos, mecánicos y operativos. Su magnitud no está determinada únicamente por la tecnología utilizada, sino también por el diseño del sistema, el estado de la infraestructura, las condiciones de operación, los niveles de mantenimiento y la disponibilidad de información para la toma de decisiones.

En los sistemas hidráulicos, las pérdidas de energía están estrechamente relacionadas con las características de las tuberías, accesorios y equipos de conducción. Entre los factores más relevantes se encuentran la longitud y diámetro de las tuberías, la rugosidad interna, la velocidad del flujo, la presión

de operación, la presencia de válvulas, codos, reducciones, ampliaciones, obstrucciones, incrustaciones o cambios bruscos de dirección. A medida que aumenta la fricción o se deterioran las condiciones hidráulicas, se requiere mayor energía para transportar el mismo volumen de agua.

La operación de redes con presiones inadecuadas también puede incrementar los requerimientos energéticos. Presiones excesivas pueden aumentar fugas y pérdidas físicas de agua, mientras que presiones insuficientes pueden obligar a operar sistemas de bombeo adicionales o mantener equipos funcionando fuera de sus rangos óptimos. En ambos casos, el resultado puede ser un mayor consumo energético por unidad de agua efectivamente entregada o tratada.

En los sistemas de bombeo, las pérdidas pueden estar asociadas al sobredimensionamiento de equipos, operación fuera del punto de máxima eficiencia, desgaste de impulsores, cavitación, desalineación, falta de mantenimiento, arranques y paradas frecuentes, o uso de motores de baja eficiencia. También pueden generarse pérdidas cuando las bombas operan a velocidad fija en sistemas con demanda variable, sin mecanismos de control que ajusten la operación a los requerimientos reales de caudal o presión.

En las instalaciones eléctricas, las pérdidas pueden originarse en transformadores ineficientes, conductores deteriorados, tableros obsoletos, bajo factor de potencia, conexiones inadecuadas, sobrecargas, ausencia de protección o falta de sistemas de medición. Estas condiciones no solo elevan el consumo o los costos de energía, sino que también pueden aumentar riesgos operativos, reducir la vida útil de los equipos y afectar la confiabilidad del servicio.

En las plantas de tratamiento de aguas residuales, las pérdidas e ineficiencias pueden estar asociadas a sistemas de aireación sobredimensionados, sopladores ineficientes, operación continua sin ajuste a la carga orgánica real, recirculaciones innecesarias, equipos de manejo de lodos con bajo desempeño o falta de automatización. Dado que la aireación puede representar una proporción significativa del consumo energético de las plantas de tratamiento biológico, su control operativo es uno de los ámbitos más relevantes para la mejora energética.

Además de las pérdidas asociadas al consumo, la auditoría debe considerar factores que limitan la recuperación de energía. En instalaciones de tratamiento de aguas residuales y lodos, estas limitaciones pueden incluir ausencia de digestión anaerobia, falta de sistemas de captura de biogás, quema sin aprovechamiento energético, baja disponibilidad de datos sobre carga orgánica o producción de lodos, falta de equipos de generación, restricciones de conexión eléctrica o inexistencia de condiciones para autoconsumo de la energía generada.

Por ello, el análisis de los factores que afectan las pérdidas de energía debe realizarse con una mirada integral. La auditoría debe identificar no solo dónde se consume más energía, sino también qué condiciones físicas, operativas o institucionales explican ese consumo y qué posibilidades existen para reducirlo, gestionarlo mejor o recuperar energía a partir de los procesos del propio sistema.

e) Cálculo y análisis de pérdidas energéticas en sistemas hidráulicos

El cálculo de pérdidas energéticas en sistemas hidráulicos permite estimar la energía que se disipa durante el transporte, distribución, recolección o tratamiento del agua. Estas pérdidas se producen principalmente por fricción en tuberías y por la presencia de accesorios, válvulas, codos, reducciones, ampliaciones, cambios de dirección, entradas, salidas y otros elementos que alteran el flujo. Su análisis es fundamental para determinar si un sistema está operando con niveles adecuados de eficiencia o si requiere ajustes operativos, mantenimiento o inversiones de mejora.

Las pérdidas por fricción se relacionan con la resistencia que encuentra el agua al desplazarse por las tuberías. Dependen del caudal, la velocidad del flujo, el diámetro, la longitud, la rugosidad interna de las tuberías y las propiedades del fluido. En términos generales, a mayor longitud, rugosidad o velocidad, mayores serán las pérdidas de carga y, por tanto, mayor será la energía requerida para movilizar el agua. Esto puede traducirse en mayores costos de bombeo y menor eficiencia del sistema.

Existen distintos métodos para estimar las pérdidas de carga por fricción, entre ellos las ecuaciones de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Manning. La selección del método depende del tipo de sistema, la información disponible, las características de las tuberías, el régimen de flujo y los criterios técnicos aplicables. Estas herramientas permiten cuantificar las pérdidas hidráulicas y estimar la energía adicional que debe ser suministrada por los equipos de bombeo para compensarlas.

Además de las pérdidas por fricción, deben considerarse las pérdidas localizadas o pérdidas menores, asociadas a accesorios e irregularidades del sistema. Aunque se denominan “menores”, pueden ser significativas cuando existen múltiples válvulas, codos, reducciones, bifurcaciones, entradas, salidas, medidores u otros elementos que alteran la trayectoria del flujo. En sistemas con diseños poco optimizados o con infraestructura envejecida, estas pérdidas pueden acumularse y afectar de manera relevante el desempeño energético.

El análisis de pérdidas energéticas debe apoyarse tanto en cálculos hidráulicos como en información de campo. Para ello, la auditoría puede utilizar mediciones de caudal, presión, nivel, potencia eléctrica, horas de operación y consumo energético. La comparación entre los valores teóricos y los datos medidos permite identificar desviaciones, sobreconsumos, pérdidas no explicadas, operación fuera de rangos óptimos o inconsistencias en la información disponible.

Cuando el sistema es complejo, se recomienda complementar el análisis con herramientas de modelación hidráulica y energética. Los modelos permiten simular distintos escenarios de operación, evaluar el impacto de cambios en presión, caudal, horarios de bombeo, sectorización, sustitución de tuberías o incorporación de equipos eficientes. También permiten estimar los beneficios potenciales de medidas como la reducción de fugas, el rediseño de esquemas de bombeo, la regulación de presiones o la incorporación de variadores de frecuencia.

La detección de fugas y pérdidas físicas de agua también debe integrarse al análisis energético. Cada metro cúbico de agua que se pierde en la red representa energía consumida en captación, tratamiento, bombeo y distribución que no se transforma en servicio efectivo. Por ello, la reducción de pérdidas de agua tiene un efecto directo sobre la eficiencia energética y económica del prestador. En este sentido, las auditorías energéticas deben coordinarse, cuando sea posible, con programas de gestión de pérdidas, sectorización hidráulica, medición y control de presiones.

En sistemas de saneamiento, el análisis de pérdidas debe considerar también estaciones de bombeo, redes de recolección, recirculaciones internas, aireación, manejo de lodos y procesos auxiliares. La operación ineficiente de estos componentes puede incrementar el consumo energético por metro cúbico tratado o por unidad de carga removida. En plantas de tratamiento de aguas residuales, la evaluación energética debe revisar especialmente los sistemas de aireación y bombeo, debido a su alta participación en el consumo total.

El resultado de este análisis debe permitir identificar puntos críticos de intervención y estimar su potencial de mejora. Las medidas pueden incluir limpieza o renovación de tuberías, reducción de pérdidas físicas, optimización de presiones, corrección de accesorios ineficientes, mantenimiento de bombas, sustitución de equipos, ajuste de horarios de operación, instalación de variadores de frecuencia, mejora de medición o incorporación de sistemas de control. Todas estas opciones deben evaluarse posteriormente en función de su viabilidad técnica, económica y ambiental.

El recuadro 1 presenta algunas fórmulas de referencia que pueden utilizarse para estimar pérdidas hidráulicas y energía de bombeo, siempre que se cuente con información validada de campo y mediciones operativas suficientes.

Recuadro 1**Fórmulas de referencia para estimar pérdidas hidráulicas y energía de bombeo**

El cálculo de pérdidas energéticas en sistemas hidráulicos puede apoyarse en distintas ecuaciones, dependiendo del tipo de sistema, la información disponible y los criterios técnicos aplicables. Entre las fórmulas de uso más frecuente se encuentran las siguientes:

Pérdida de carga por fricción mediante Darcy-Weisbach

$$h_x = f \cdot (L/D) \cdot (v^2/2g)$$

Donde h_x representa la pérdida de carga por fricción; f es el factor de fricción; L es la longitud de la tubería; D es el diámetro interno; v es la velocidad media del flujo; y g es la aceleración de la gravedad.

Pérdida de carga por fricción mediante Hazen-Williams

$$h_x = 10,67 \cdot L \cdot Q^{1,852} / (C^{1,852} \cdot D^{4,871})$$

Donde h_x es la pérdida de carga; L es la longitud de la tubería; Q es el caudal; C es el coeficiente de Hazen-Williams; y D es el diámetro interno de la tubería. Esta expresión se utiliza ampliamente en sistemas de conducción de agua a presión.

Pérdidas localizadas por accesorios

$$h_m = K \cdot (v^2/2g)$$

Donde h_m representa la pérdida localizada; K es el coeficiente asociado al accesorio o singularidad hidráulica; v es la velocidad media del flujo; y g es la aceleración de la gravedad. Esta fórmula se utiliza para estimar pérdidas asociadas a válvulas, codos, reducciones, entradas, salidas u otros elementos que alteran el flujo.

Potencia hidráulica requerida

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

Donde P_h es la potencia hidráulica; ρ es la densidad del agua; g es la aceleración de la gravedad; Q es el caudal; y H es la altura total de bombeo. Para estimar la potencia eléctrica requerida, debe considerarse además la eficiencia global del sistema de bombeo.

Estas fórmulas deben ser aplicadas con información validada de campo y complementarse con mediciones de caudal, presión, potencia eléctrica y horas de operación. Su uso permite estimar pérdidas, comparar escenarios de operación y evaluar el potencial de ahorro energético asociado a mejoras hidráulicas, electromecánicas u operativas.

Fuente: Elaboración propia.

3. Fase 3: Identificación y priorización de oportunidades de mejora

Una vez evaluado el desempeño energético de los procesos clave e identificadas las principales pérdidas e ineficiencias, la auditoría debe traducir los hallazgos técnicos en oportunidades concretas de mejora. Esta fase permite construir una cartera de medidas orientadas a reducir el consumo energético, disminuir costos operativos, mejorar la confiabilidad del servicio, reducir emisiones y, cuando sea posible, recuperar o generar energía dentro del propio sistema.

Las oportunidades identificadas pueden organizarse en cuatro grupos principales: i) medidas operativas y de gestión; ii) medidas de mantenimiento y mejora de activos; iii) inversiones en tecnologías eficientes y sistemas de control; y iv) alternativas de recuperación o generación de energía. Esta clasificación facilita la priorización de acciones según su complejidad, costo, impacto esperado y tiempo de implementación.

Las medidas operativas y de gestión corresponden a acciones que pueden implementarse con inversiones limitadas o mediante ajustes en la operación cotidiana. Incluyen la optimización de horarios de bombeo, el manejo de carga para evitar horarios de mayor costo eléctrico, la regulación de presiones, el ajuste de secuencias de operación, la reducción de bombeos innecesarios, la mejora de rutinas de operación y el uso más sistemático de información disponible para la toma de decisiones.

Las medidas de mantenimiento y mejora de activos buscan corregir ineficiencias asociadas al deterioro de equipos e infraestructura. Pueden incluir mantenimiento preventivo y correctivo de bombas, motores, sopladores y tableros eléctricos; limpieza o rehabilitación de tuberías; reducción de obstrucciones; mejora del factor de potencia; reparación de fugas; calibración de instrumentos; y revisión periódica de equipos electromecánicos. Estas medidas pueden generar ahorros relevantes cuando existen equipos envejecidos, operación fuera de rango o pérdidas acumuladas en redes e instalaciones.

Las inversiones en tecnologías eficientes y sistemas de control comprenden intervenciones que requieren mayor inversión inicial, pero que pueden generar beneficios sostenidos en el tiempo. Entre ellas se incluyen la sustitución de bombas y motores por equipos de mayor eficiencia, la instalación de variadores de frecuencia, la modernización de sistemas de aireación, la incorporación de sistemas de supervisión, control y adquisición de datos, la automatización de estaciones de bombeo, la sectorización hidráulica y la mejora de sistemas de medición energética, hidráulica y operativa.

Las alternativas de recuperación o generación de energía incluyen medidas que permiten aprovechar recursos energéticos disponibles dentro del propio sistema o incorporar fuentes renovables. En plantas de tratamiento de aguas residuales, estas oportunidades pueden estar asociadas al aprovechamiento del metano generado en procesos de tratamiento y manejo de lodos, al uso de biogás para generación eléctrica o térmica, o al autoconsumo de la energía producida. También pueden incluir la instalación de sistemas solares fotovoltaicos, pequeñas soluciones renovables para instalaciones aisladas o combinaciones tecnológicas que reduzcan la dependencia de energía comprada.

La priorización de las oportunidades debe realizarse considerando criterios técnicos, económicos, ambientales e institucionales. Entre los criterios técnicos se encuentran la factibilidad de implementación, la compatibilidad con la operación existente, la disponibilidad de información, la confiabilidad de los equipos y los requerimientos de mantenimiento. Entre los criterios económicos se incluyen la inversión requerida, los ahorros esperados, el período de recuperación, la relación beneficio/costo y la disponibilidad de financiamiento. Entre los criterios ambientales se consideran la reducción de emisiones, la disminución de pérdidas de agua, la valorización de subproductos y los beneficios asociados a la economía circular. Finalmente, los criterios institucionales incluyen la capacidad del prestador para operar, mantener y dar seguimiento a las medidas propuestas.

Como resultado, la auditoría debe distinguir entre medidas de corto, mediano y largo plazo. Las medidas de corto plazo suelen corresponder a ajustes operativos, mantenimiento, mejoras de medición o cambios en la gestión de la demanda energética. Las de mediano plazo pueden incluir sustitución de equipos, instalación de variadores de frecuencia, automatización o mejora de sistemas eléctricos. Las de largo plazo pueden incluir proyectos de recuperación energética, aprovechamiento de metano, incorporación de fuentes renovables, rediseño de procesos o inversiones estructurales en infraestructura.

La cartera final de medidas debe presentar, para cada oportunidad identificada, una descripción de la intervención, el problema que busca resolver, la instalación o proceso asociado, la inversión estimada, el ahorro energético esperado, el ahorro económico potencial, la reducción de emisiones cuando corresponda, el período de recuperación de la inversión, los riesgos de implementación y los indicadores propuestos para el seguimiento. Esta información permite que la auditoría se convierta en una herramienta práctica para la planificación, la toma de decisiones, la estructuración de proyectos y la búsqueda de financiamiento.

En particular, cuando se identifiquen oportunidades de aprovechamiento energético del metano, la auditoría debe recomendar análisis complementarios de prefactibilidad técnica, económica y regulatoria. Estos análisis deben considerar el potencial de generación de biogás, la demanda energética de la instalación, las posibilidades de autoconsumo, la eventual existencia de excedentes, los costos de inversión, los requisitos de operación y mantenimiento, las emisiones evitadas y las condiciones regulatorias aplicables para valorizar la energía generada.

4. Fase 4: Plan de implementación, seguimiento y verificación

La fase final de la auditoría energética consiste en formular un plan de implementación, seguimiento y verificación de las oportunidades priorizadas. Este plan debe traducir los resultados técnicos de la auditoría en una hoja de ruta operativa para el prestador, indicando qué medidas se recomienda implementar, en qué orden, con qué recursos, bajo qué responsabilidades y con qué indicadores de seguimiento.

El plan debe organizar las medidas de acuerdo con su horizonte de implementación. Las acciones de corto plazo pueden incluir ajustes operativos, mejoras en rutinas de mantenimiento, corrección de horarios de bombeo, revisión de contratos o tarifas eléctricas, calibración de equipos de medición, regulación de presiones y medidas de bajo costo asociadas a la gestión cotidiana. Las acciones de mediano plazo pueden considerar sustitución de equipos ineficientes, instalación de variadores de frecuencia, modernización de sistemas eléctricos, automatización de procesos, mejora de sistemas de aireación o fortalecimiento de la medición energética e hidráulica. Las acciones de largo plazo pueden incluir inversiones estructurales, recuperación energética, aprovechamiento del metano, incorporación de fuentes renovables, rediseño de procesos o intervenciones mayores en infraestructura.

Para cada medida priorizada, el plan debe incluir al menos una descripción de la intervención, la instalación o proceso asociado, el problema identificado, la inversión estimada, los ahorros energéticos esperados, los beneficios económicos, el período de recuperación, las emisiones evitadas cuando corresponda, los requerimientos de operación y mantenimiento, los riesgos de implementación y las responsabilidades institucionales. Esta información permite que la auditoría se convierta en un insumo para la programación de inversiones, la búsqueda de financiamiento y la toma de decisiones regulatorias o tarifarias.

El seguimiento y la verificación son componentes esenciales del proceso. Para ello, se deben definir líneas de base e indicadores de desempeño energético que permitan comparar la situación previa y posterior a la implementación de las medidas. Estos indicadores pueden incluir consumo energético por metro cúbico producido, bombeado o tratado; costo energético por unidad de servicio; eficiencia de bombas y motores; consumo asociado a aireación; pérdidas de agua; energía recuperada o generada; emisiones evitadas; ahorro económico real; y cumplimiento de los períodos de recuperación estimados.

Asimismo, el plan debe establecer mecanismos de revisión periódica de resultados. Esto permite identificar desviaciones, corregir problemas de implementación, actualizar supuestos, ajustar la operación y fortalecer la mejora continua del desempeño energético. Cuando existan sistemas de medición, automatización o supervisión en tiempo real, estos deben aprovecharse para alimentar el seguimiento y mejorar la capacidad de respuesta del prestador.

En el caso de proyectos de recuperación energética, especialmente aquellos asociados al aprovechamiento del metano, el seguimiento debe incorporar variables adicionales. Entre ellas se incluyen el volumen de biogás generado, la proporción de metano, la energía eléctrica o térmica producida, la energía autoconsumida, los eventuales excedentes, las emisiones evitadas, los costos de operación y mantenimiento, la disponibilidad de los equipos y los beneficios económicos obtenidos. Estos datos son necesarios para evaluar la sostenibilidad del proyecto y su potencial de replicabilidad.

En síntesis, el plan de implementación, seguimiento y verificación permite cerrar el ciclo de la auditoría energética. A partir de la información recolectada y analizada, el prestador puede pasar de la identificación de ineficiencias a la ejecución de medidas concretas, verificables y alineadas con sus capacidades técnicas y financieras. A partir de este marco de auditoría, el siguiente capítulo examina las medidas y oportunidades concretas de eficiencia y recuperación energética disponibles para los prestadores, organizadas según el proceso del sistema donde se aplican y el tipo de beneficio que generan.

III. Medidas y oportunidades para la eficiencia y recuperación energética en agua y saneamiento

Una vez identificados los principales consumos, pérdidas e ineficiencias mediante una auditoría energética, el siguiente paso consiste en definir una cartera de medidas que permita mejorar el desempeño energético de los prestadores. Estas medidas pueden combinar acciones operativas de rápida implementación, inversiones en tecnologías eficientes, sistemas de automatización y control, incorporación de fuentes renovables y alternativas de recuperación energética a partir de los propios procesos del sector.

En los servicios de agua y saneamiento, las oportunidades de mejora no se concentran en una sola instalación ni en una única tecnología. Pueden encontrarse en sistemas de captación y bombeo, redes de distribución, redes de recolección, plantas de tratamiento de agua potable, plantas de tratamiento de aguas residuales, sistemas de aireación, manejo de lodos, instalaciones eléctricas, equipos electromecánicos y sistemas de medición. Por ello, la eficiencia energética debe abordarse como una estrategia integral de gestión, capaz de reducir costos operativos, mejorar la confiabilidad del servicio, disminuir emisiones y fortalecer la sostenibilidad financiera de los prestadores.

Las medidas disponibles pueden ordenarse en dos grandes grupos. El primero corresponde a medidas operativas y de gestión, tales como el manejo de carga, la optimización de horarios de bombeo, la regulación de presiones, la mejora de rutinas de mantenimiento, el uso de información operativa y la automatización de procesos. El segundo corresponde a medidas de inversión, incluyendo la sustitución de equipos, la instalación de variadores de frecuencia, la mejora de instalaciones eléctricas, la incorporación de sistemas de control, el uso de energías renovables y el aprovechamiento energético del metano generado en el tratamiento de aguas residuales.

A su vez, las medidas pueden analizarse según el proceso del sistema donde se aplican. Algunas son más relevantes para captación, bombeo, suministro y redes de acueducto o alcantarillado; otras se concentran en plantas de tratamiento de agua potable, plantas de tratamiento de aguas residuales y manejo de lodos. Esta diferenciación es importante porque el potencial de ahorro, los costos de implementación y los beneficios esperados dependen de las condiciones específicas de cada proceso.

Este capítulo presenta un conjunto de medidas y oportunidades aplicables al sector de agua y saneamiento en América Latina y el Caribe. En primer lugar, se revisan opciones de eficiencia energética y optimización operativa, incluyendo manejo de carga, sistemas de control, variadores de frecuencia y

sustitución de motores. En segundo lugar, se analizan alternativas de generación y recuperación energética, con énfasis en energía solar y aprovechamiento del metano a partir de aguas residuales. Finalmente, se introduce la importancia de vincular estas oportunidades técnicas con condiciones regulatorias que permitan valorizar la energía generada, aspecto que se desarrolla en el capítulo siguiente.

A. Medidas de eficiencia energética y optimización operativa

Las medidas de eficiencia energética y optimización operativa buscan reducir el consumo de energía requerido para prestar los servicios de agua y saneamiento sin afectar la calidad, continuidad o seguridad de la operación. Estas medidas permiten mejorar el desempeño de los sistemas existentes mediante ajustes en la gestión, el mantenimiento, la automatización, el control operativo y la sustitución de equipos ineficientes.

En muchos casos, estas acciones pueden generar ahorros significativos sin requerir grandes transformaciones estructurales. Su aplicación depende de la disponibilidad de información, la capacidad técnica del prestador, el estado de los activos y las condiciones específicas de cada sistema. Por ello, la auditoría energética cumple un papel central para identificar cuáles medidas son técnicamente viables, económicamente justificables y operativamente sostenibles.

1. Manejo de carga de energía en sistemas de agua y saneamiento

El manejo de carga consiste en ajustar la operación de equipos intensivos en energía, especialmente sistemas de bombeo, para reducir costos asociados al consumo eléctrico y optimizar el uso de la infraestructura disponible. Esta medida resulta particularmente relevante cuando las tarifas eléctricas varían según horarios, niveles de demanda o potencia contratada.

En los sistemas de agua potable, el manejo de carga puede implicar modificar horarios de bombeo, aprovechar períodos de menor costo eléctrico, utilizar tanques de almacenamiento para desplazar consumos fuera de horas punta, evitar arranques simultáneos de equipos y reducir la operación de bombas durante períodos de alta demanda tarifaria. En los sistemas de saneamiento, puede aplicarse en estaciones elevadoras, recirculaciones, sistemas de aireación, bombeo de lodos u otros procesos electromecánicos.

La implementación de esta medida requiere analizar las curvas de carga eléctrica, la demanda horaria del sistema, los niveles de almacenamiento, las presiones de operación, la continuidad del servicio y las restricciones hidráulicas. También exige revisar los contratos y estructuras tarifarias aplicables, con el fin de identificar oportunidades para reducir costos sin comprometer la operación.

El manejo de carga no necesariamente reduce el volumen total de energía consumida, pero puede disminuir el costo de la energía y mejorar la eficiencia económica del prestador. Cuando se combina con automatización, medición en tiempo real y sistemas de control, también puede contribuir a reducir consumos innecesarios, mejorar la confiabilidad operativa y extender la vida útil de los equipos.

2. Sistemas de control y gestión de datos

Los sistemas de control y gestión de datos permiten monitorear, automatizar y optimizar la operación de instalaciones y procesos del sector de agua y saneamiento. Su importancia radica en que muchas ineficiencias energéticas se originan en la falta de información oportuna sobre caudales, presiones, niveles, consumos eléctricos, estado de equipos, calidad de agua o condiciones de operación.

Entre las herramientas más relevantes se encuentran los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos, conocidos como sistemas SCADA, así como sensores, caudalímetros, medidores de presión, analizadores de energía, medidores de nivel, sistemas de telemetría y plataformas de gestión operativa. Estas herramientas permiten registrar información en tiempo real, detectar desviaciones, anticipar fallas, reducir tiempos de respuesta y ajustar la operación a las condiciones reales de demanda.

En redes de agua potable, los sistemas de control pueden contribuir a regular presiones, reducir fugas, optimizar bombeos, mejorar la sectorización hidráulica y controlar niveles en tanques. En plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales, pueden ayudar a ajustar la dosificación, la aireación, la recirculación, el bombeo y otros procesos a las condiciones efectivas de operación. En estaciones de bombeo, permiten mejorar la secuencia de arranque y parada de equipos, evitar sobrecargas y optimizar el uso de bombas según su eficiencia.

La incorporación de sistemas de control debe acompañarse de capacidades institucionales para utilizar la información generada. No basta con instalar equipos de medición si los datos no se analizan, validan y utilizan para tomar decisiones. Por ello, la gestión de datos debe integrarse a rutinas operativas, indicadores de desempeño energético, mantenimiento preventivo y procesos de mejora continua.

3. Variadores de frecuencia

Los variadores de frecuencia son dispositivos electrónicos que permiten controlar la velocidad de motores eléctricos, ajustando su operación a los requerimientos reales de caudal, presión o carga del sistema. En los servicios de agua y saneamiento, su aplicación es especialmente relevante en equipos de bombeo, sopladores, sistemas de aireación y otros procesos con demanda variable.

En sistemas donde las bombas operan a velocidad fija, es frecuente que los equipos funcionen por encima de las necesidades reales del sistema, generando sobreconsumo, mayores presiones, desgaste mecánico y costos innecesarios. Los variadores de frecuencia permiten adaptar la velocidad del motor a la demanda efectiva, reduciendo el consumo energético y mejorando la eficiencia operativa.

Además del ahorro de energía, los variadores pueden generar beneficios adicionales, como reducción de golpes de ariete, menor desgaste de equipos, disminución de arranques bruscos, mayor estabilidad en la presión de redes, mejor control del proceso y extensión de la vida útil de motores y bombas. Su instalación debe evaluarse caso a caso, considerando el perfil de demanda, las horas de operación, el estado de los equipos, la compatibilidad eléctrica, el ahorro esperado y el período de recuperación de la inversión.

En plantas de tratamiento de aguas residuales, los variadores pueden contribuir a optimizar procesos de aireación o bombeo cuando existen variaciones significativas en caudal o carga contaminante. En estos casos, su efecto puede ser mayor si se combinan con sensores, automatización y control en tiempo real.

4. Sustitución de motores y equipos de baja eficiencia

La sustitución de motores, bombas, sopladores y otros equipos de baja eficiencia constituye una medida relevante cuando los activos existentes presentan antigüedad, deterioro, sobredimensionamiento, bajo rendimiento o altos costos de mantenimiento. En sistemas de agua y saneamiento, los equipos electromecánicos suelen operar durante muchas horas al año, por lo que pequeñas mejoras en eficiencia pueden traducirse en ahorros acumulados significativos.

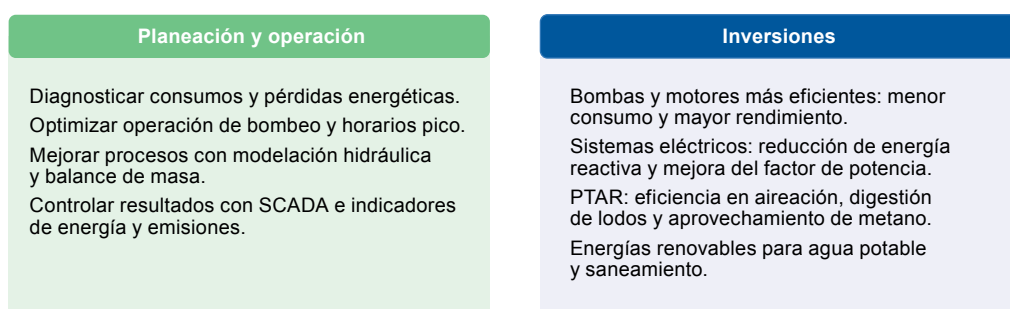
La evaluación de esta medida debe considerar no solo la eficiencia nominal del equipo, sino también sus condiciones reales de operación. Un motor o bomba eficiente puede operar de manera ineficiente si está sobredimensionado, si trabaja fuera de su punto óptimo, si el sistema hidráulico presenta pérdidas elevadas o si no existe control adecuado de la demanda. Por ello, la sustitución de equipos debe analizarse junto con el diseño hidráulico, los patrones de operación, el mantenimiento y los sistemas de control.

Entre las opciones disponibles se encuentran motores de alta eficiencia, bombas mejor ajustadas a la curva del sistema, sopladores más eficientes, equipos con mejor desempeño en cargas parciales y soluciones integradas con variadores de frecuencia. En algunos casos, también puede ser necesario revisar tableros eléctricos, sistemas de protección, bancos de condensadores o instalaciones asociadas para asegurar que la nueva tecnología opere correctamente.

La decisión de sustituir equipos debe sustentarse en una evaluación técnica y económica que estime inversión requerida, ahorro energético esperado, reducción de costos, vida útil, necesidades de mantenimiento, riesgos de operación y período de recuperación. Cuando se implementa de manera adecuada, esta medida puede mejorar la eficiencia energética, reducir fallas, aumentar la confiabilidad del servicio y liberar recursos operativos para otras prioridades del prestador.

Como se muestra en el diagrama 6, estas medidas pueden generar beneficios directos en términos de reducción de consumo energético, disminución de costos, mejora del factor de potencia, mayor eficiencia de motores y bombas, y reducción de pérdidas operativas. En conjunto, permiten avanzar desde intervenciones puntuales hacia una estrategia de mejora continua del desempeño energético.

Diagrama 6
Resumen de medidas operativas y de inversión



Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, el manejo de carga, la automatización, los variadores de frecuencia y la sustitución de equipos permiten reducir el consumo energético y mejorar la operación de los sistemas existentes. Estas medidas constituyen una primera línea de acción para los prestadores, especialmente cuando se combinan con auditorías energéticas, indicadores de desempeño y planes de seguimiento. Sin embargo, la agenda energética del sector no se agota en consumir menos energía. También incluye la posibilidad de generar o recuperar energía, aspecto que se analiza en el siguiente apartado.

El diagrama 7 sintetiza estas medidas organizadas según el proceso del sistema donde se aplican —captación y suministro, redes de distribución y alcantarillado, plantas de tratamiento de agua potable y plantas de tratamiento de aguas residuales—, con el fin de facilitar su identificación y priorización según las condiciones específicas de cada prestador.

Diagrama 7
Resumen de medidas de eficiencia energética en suministro, redes y plantas de tratamiento



Fuente: Elaboración propia.

B. Fuentes renovables y recuperación energética en el sector de agua y saneamiento

Además de reducir el consumo energético mediante medidas de eficiencia y optimización operativa, los prestadores de servicios de agua y saneamiento pueden incorporar fuentes renovables y alternativas de recuperación energética. Estas opciones permiten disminuir la dependencia de energía comprada, reducir costos operativos, mejorar la resiliencia del servicio y contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

En el sector, las oportunidades de generación y recuperación energética pueden adoptar distintas formas. Algunas corresponden a la incorporación de fuentes renovables externas al proceso, como la energía solar fotovoltaica en instalaciones operativas o administrativas. Otras se vinculan directamente con los propios procesos del ciclo del agua, como el aprovechamiento del metano generado en el tratamiento de aguas residuales y lodos. Esta segunda categoría resulta especialmente relevante desde una perspectiva de economía circular, porque permite transformar un subproducto del saneamiento en una fuente de energía útil.

La selección de estas alternativas debe basarse en criterios técnicos, económicos, regulatorios y operativos. No todas las instalaciones presentan el mismo potencial de generación o recuperación energética. En cada caso, es necesario evaluar la demanda energética de la instalación, la disponibilidad del recurso, la estabilidad de la operación, la inversión requerida, los costos de mantenimiento, las capacidades técnicas del prestador y las condiciones regulatorias aplicables para el autoconsumo, la compensación o la eventual venta de excedentes.

1. Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica constituye una alternativa renovable aplicable a distintas instalaciones del sector de agua y saneamiento. Puede utilizarse para abastecer parcialmente el consumo eléctrico de oficinas, estaciones de bombeo, plantas de tratamiento, sistemas de monitoreo, iluminación, equipos auxiliares o instalaciones ubicadas en zonas aisladas. Su incorporación puede contribuir a reducir costos energéticos, diversificar fuentes de suministro y disminuir emisiones asociadas al consumo eléctrico.

Los sistemas solares fotovoltaicos pueden diseñarse bajo distintas configuraciones. En instalaciones conectadas a la red eléctrica, pueden operar como sistemas de autoconsumo, reduciendo la energía comprada durante las horas de generación solar. Cuando el marco regulatorio lo permite, también pueden habilitar mecanismos de medición neta, compensación o venta de excedentes. En instalaciones aisladas, pueden combinarse con baterías u otras fuentes de respaldo para asegurar continuidad operativa.

La viabilidad de esta alternativa depende de la disponibilidad de radiación solar, superficie adecuada para instalar paneles, perfil horario de consumo, costos de inversión, condiciones de conexión, requisitos de operación y mantenimiento, y reglas regulatorias aplicables. En sistemas de bombeo o plantas de tratamiento con demanda constante, la energía solar puede cubrir una fracción del consumo, aunque generalmente requiere complementariedad con la red eléctrica u otras fuentes debido a la variabilidad diaria y estacional de la generación.

Para los prestadores, la energía solar puede ser especialmente atractiva cuando existen altos costos de energía, disponibilidad de terrenos o cubiertas, instalaciones con consumos diurnos relevantes y condiciones regulatorias favorables. Sin embargo, su incorporación debe evaluarse como parte de una estrategia energética integral. Antes de dimensionar sistemas de generación solar, es recomendable identificar oportunidades de eficiencia y optimización operativa, de manera que la capacidad instalada responda a una demanda energética previamente racionalizada.

2. Aprovechamiento del metano a partir de aguas residuales

El aprovechamiento del metano generado en el tratamiento de aguas residuales constituye una de las oportunidades más relevantes de recuperación energética en el sector de saneamiento. En determinadas condiciones, la degradación de materia orgánica contenida en aguas residuales y lodos produce biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono. Si este metano se libera a la atmósfera, contribuye al calentamiento global; si se captura y aprovecha, puede utilizarse como fuente de energía eléctrica o térmica.

Esta alternativa permite vincular eficiencia energética, acción climática, economía circular y sostenibilidad financiera. Desde el punto de vista energético, el biogás puede utilizarse para generar electricidad destinada al autoconsumo de la planta o para producir calor en procesos internos. Desde el punto de vista económico, puede reducir la factura eléctrica del prestador y mejorar la estabilidad de los costos de operación. Desde el punto de vista ambiental, permite disminuir emisiones de metano y reducir la huella de carbono del saneamiento.

El potencial de aprovechamiento depende de varios factores. Entre ellos se encuentran el caudal tratado, la carga orgánica del afluente, la tecnología de tratamiento, la existencia de procesos anaerobios, la producción y manejo de lodos, la disponibilidad de sistemas de captura de biogás, la demanda energética de la instalación y las condiciones de operación. También influyen la escala de la planta, la continuidad del proceso, la capacidad técnica del prestador y la existencia de condiciones regulatorias para valorizar la energía generada.

El uso energético del metano puede adoptar distintas modalidades. En algunos casos, el biogás puede utilizarse para generación eléctrica mediante motogeneradores o sistemas de cogeneración. En otros, puede destinarse a usos térmicos internos, por ejemplo, para apoyar procesos de digestión, secado o tratamiento de lodos. También puede combinarse con otras fuentes renovables o con medidas de eficiencia para aumentar la autosuficiencia energética de la instalación.

La evaluación de esta alternativa requiere estimar tanto el potencial técnico como la viabilidad económica. Para ello, deben considerarse variables como volumen de metano recuperable, energía potencialmente generada, inversión requerida, costos de operación y mantenimiento, ahorro energético, emisiones evitadas, vida útil de los equipos y período de recuperación de la inversión. Herramientas como la Calculadora de Metano de la CEPAL pueden apoyar una estimación preliminar de estos elementos y orientar análisis posteriores de prefactibilidad (véase recuadro 2).

Recuadro 2

La Calculadora de Metano de la CEPAL^a: estimación preliminar del potencial energético en plantas de mediano y menor tamaño

A partir de los diagnósticos de 75 plantas de tratamiento de aguas residuales medianas —de 500 a 4.000 m³ por segundo (l/s)— elaborados en cinco países, la CEPAL estima que una inversión de unos 250 millones de dólares, con un período de recuperación de la inversión de cerca de los 46 millones de dólares, podría generar ahorros energéticos anuales cercanos a los 46 millones de dólares, con un período de recuperación de cerca del 40% y una disminución estimada de 88% de las emisiones de metano (Saravia Matus et al., 2022).

Un segundo análisis de siete plantas de tratamiento pequeñas y medianas —de 30 a 220 l/s— en El Salvador mostró que una inversión de 5,37 millones de dólares permitiría ahorrar 1,35 millones de dólares al año, con un período de recuperación de la inversión promedio de 5,5 años y reducciones de alrededor de 5.200 toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) anuales (Saravia Matus et al., 2024).

En este marco, y con el fin de operacionalizar estos hallazgos, la CEPAL generó una herramienta metodológica de libre acceso que permite estimar, de forma rápida y sin requerimientos de modelado avanzado, el potencial de aprovechamiento energético del metano en cualquier PTAR municipal, denominada la Calculadora de Metano, cuyas funcionalidades centrales son: i) el cálculo de emisiones y captura potencial de metano, con base en la

metodología del IPCC 2019 y parámetros de entrada como el caudal tratado, la concentración de carga orgánica (DBO/DQO) y la tecnología de tratamiento; ii) el cálculo preliminar de costos de inversión, incluyendo sistemas de digestión de lodos y generación eléctrica; y iii) la evaluación financiera preliminar —TIR, payback y costo social del carbono— con base en el ahorro en costos de suministro de energía eléctrica.

Si bien, esta herramienta no reemplaza los estudios de prefactibilidad detallados que requieren las decisiones de inversión, pero sí constituye el primer paso técnico para identificar si una planta —independientemente de su escala— presenta condiciones mínimas que justifiquen avanzar en ese proceso. En contextos donde los recursos técnicos y financieros para contratar estudios son limitados, esta capacidad de tamizaje preliminar tiene un valor estratégico considerable para prestadores, reguladores y organismos de financiamiento que buscan priorizar carteras de proyectos de eficiencia y recuperación energética en el sector de agua y saneamiento.

Fuente: Elaboración propia.

^a Véase más información en Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2025, 28 de noviembre). Calculadora de Metano: evaluación del aprovechamiento energético del biogás en plantas de tratamiento. <https://www.cepal.org/es/notas/calculadora-metano-evaluacion-aprovechamiento-energetico-biogas-plantas-tratamiento>.

Finalmente, el aprovechamiento del metano no debe entenderse como una medida aislada, sino como parte de una estrategia más amplia de gestión energética y economía circular en el saneamiento. Su implementación puede requerir mejoras en la operación de la planta, fortalecimiento de capacidades técnicas, sistemas de medición y monitoreo, mantenimiento especializado, análisis de seguridad y evaluación de condiciones regulatorias. Cuando estas condiciones se cumplen, el metano puede pasar de ser un pasivo ambiental para convertirse en un activo energético para los prestadores.

3. Criterios para seleccionar alternativas de generación y recuperación energética

La selección de alternativas de generación y recuperación energética debe considerar la relación entre el potencial disponible, la demanda energética de la instalación y la capacidad del prestador para operar y mantener la solución. Una medida técnicamente posible no necesariamente será viable si no existen condiciones económicas, institucionales o regulatorias adecuadas.

Entre los criterios técnicos se deben considerar la disponibilidad y estabilidad del recurso energético, la compatibilidad con los procesos existentes, la escala de la instalación, la confiabilidad esperada, las necesidades de operación y mantenimiento, y la posibilidad de integrar la solución con sistemas de medición y control. Entre los criterios económicos se encuentran la inversión inicial, los costos recurrentes, el ahorro esperado, el período de recuperación, la disponibilidad de financiamiento y la capacidad de capturar beneficios económicos asociados a la energía generada.

Los criterios ambientales incluyen la reducción de emisiones, la valorización de subproductos, la disminución de impactos locales y la contribución a estrategias de economía circular. En el caso del metano, la reducción de emisiones es especialmente relevante debido a su alto potencial de calentamiento global. Finalmente, los criterios regulatorios son fundamentales para determinar si la energía generada puede utilizarse para autoconsumo, compensarse contra la factura eléctrica, venderse como excedente o incorporarse a esquemas de generación distribuida, autogeneración o energías renovables.

Por ello, las alternativas de generación y recuperación energética deben evaluarse como proyectos integrales. Su viabilidad depende de la interacción entre tecnología, operación, finanzas, regulación y capacidades institucionales. Esta mirada es particularmente importante para el aprovechamiento del metano, ya que su potencial técnico solo se transforma en valor para los prestadores cuando existen condiciones que permiten utilizar o valorizar la energía producida.

C. De la oportunidad técnica al aprovechamiento energético

Las medidas de eficiencia, generación y recuperación energética analizadas en este capítulo muestran que los servicios de agua y saneamiento pueden reducir su consumo energético, mejorar su desempeño operativo y, en determinadas condiciones, generar energía a partir de sus propios procesos. Sin embargo, la existencia de una oportunidad técnica no garantiza por sí sola su implementación. Para que estas medidas se traduzcan en beneficios concretos para los prestadores, deben existir condiciones económicas, regulatorias e institucionales que permitan aprovechar los ahorros obtenidos o la energía generada.

En el caso de las medidas de eficiencia energética, el aprovechamiento se expresa principalmente en la reducción de la factura eléctrica, la disminución de costos de operación, la extensión de la vida útil de los equipos, la reducción de pérdidas y la mejora de la confiabilidad del servicio. Estas medidas pueden evaluarse a partir de indicadores como inversión requerida, ahorro anual, período de recuperación, relación beneficio/costo, reducción de emisiones y mejora del desempeño energético.

En el caso de la generación o recuperación de energía, el aprovechamiento puede adoptar distintas formas. La energía producida puede destinarse al autoconsumo de la instalación, reduciendo la energía comprada a la red. Cuando el marco regulatorio lo permite, también puede compensarse contra la factura eléctrica, venderse como excedente o incorporarse a esquemas de generación distribuida, autogeneración, cogeneración o promoción de energías renovables. Estas posibilidades son especialmente relevantes para proyectos de aprovechamiento de metano, en los que la viabilidad económica depende no solo del potencial de biogás, sino también de la forma en que la energía generada puede ser utilizada o remunerada.

Por ello, la evaluación de proyectos de recuperación energética debe integrar dimensiones técnicas, económicas y regulatorias. Desde el punto de vista técnico, se requiere estimar la disponibilidad del recurso, la energía potencialmente generada, la estabilidad de la operación y los requerimientos de mantenimiento. Desde el punto de vista económico, se deben analizar la inversión, los costos de operación, los ahorros, los ingresos potenciales, el período de recuperación y los riesgos asociados. Desde el punto de vista regulatorio, resulta necesario determinar si existen reglas claras para autoconsumo, conexión a red, medición, compensación de excedentes, venta de energía o acceso a incentivos.

Esta articulación es particularmente importante en el tratamiento de aguas residuales. El metano puede constituir un pasivo climático cuando se libera a la atmósfera, pero también puede transformarse en un activo energético cuando se captura y aprovecha como biogás. Para que esta transformación ocurra, los prestadores necesitan información técnica confiable, capacidades operativas, modelos financieros viables y marcos regulatorios que reconozcan el uso y eventual remuneración de la energía recuperada.

En consecuencia, la gestión energética integral del sector no termina con la identificación de medidas de eficiencia o recuperación. Requiere avanzar hacia condiciones que permitan implementar, financiar, operar y sostener estas soluciones en el tiempo. El siguiente capítulo examina precisamente esta dimensión, mediante una revisión de marcos regulatorios e incentivos para el aprovechamiento energético del biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales en países seleccionados de América Latina.

IV. Marco regulatorio e incentivos para el aprovechamiento energético del biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales

El aprovechamiento energético del biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales no depende únicamente de la existencia de metano recuperable ni de la disponibilidad de tecnologías para capturarlo y transformarlo en energía. Su viabilidad también está determinada por las condiciones regulatorias, económicas e institucionales que permiten utilizar, compensar o remunerar la energía generada. Por ello, el marco regulatorio constituye una dimensión central de la gestión energética del saneamiento.

Desde una perspectiva técnica, el biogás puede utilizarse para generar energía eléctrica o térmica destinada al autoconsumo de la planta. Esta opción permite reducir la energía comprada a la red y disminuir los costos operativos del prestador. Sin embargo, en algunos casos la energía generada puede superar parcialmente la demanda interna en determinados períodos o puede requerir mecanismos específicos de conexión, medición o compensación. En esos escenarios, las reglas aplicables a la autogeneración, generación distribuida, cogeneración, venta de excedentes o participación en mercados eléctricos adquieren especial relevancia.

La regulación también incide en la bancabilidad de los proyectos. Un proyecto de aprovechamiento de biogás puede mostrar potencial técnico y beneficios ambientales, pero enfrentar dificultades de implementación si no existen reglas claras para conexión a red, medición de energía, reconocimiento de excedentes, remuneración, acceso a incentivos o tratamiento tarifario de la inversión. De igual forma, la ausencia de coordinación entre normas de agua, energía, ambiente y cambio climático puede limitar la capacidad de los prestadores para estructurar proyectos viables.

En este contexto, el análisis regulatorio permite responder preguntas clave para la toma de decisiones: ¿puede la planta utilizar la energía generada para autoconsumo?, ¿puede compensar excedentes contra su factura eléctrica?, ¿puede vender energía a la red o a terceros?, ¿qué permisos requiere?, ¿qué mecanismos de remuneración existen?, ¿qué incentivos podrían aplicarse?, ¿qué entidad regula la conexión y bajo qué condiciones?, y ¿cómo se reconocen los beneficios ambientales o climáticos asociados a la reducción de emisiones de metano?

Este capítulo examina los marcos jurídicos, incentivos y mecanismos de remuneración aplicables al aprovechamiento energético del biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales en países seleccionados de América Latina. El objetivo no es realizar una revisión exhaustiva de todos los instrumentos energéticos vigentes, sino identificar las condiciones habilitantes que permiten transformar el biogás en una fuente de energía útil para los prestadores de servicios de agua y saneamiento. Para ello, se revisan dos dimensiones complementarias: primero, el encuadre jurídico que permite desarrollar proyectos de generación, autogeneración, cogeneración o generación distribuida a partir de biogás; y segundo, los mecanismos de incentivo o remuneración que podrían mejorar la viabilidad económica de estos proyectos.

A. Marco jurídico para la recuperación energética del biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales en países seleccionados

En términos generales, los países analizados cuentan con marcos jurídicos que reconocen distintas modalidades de generación, autogeneración, generación distribuida, cogeneración o aprovechamiento de fuentes renovables. Aunque la normativa no siempre se refiere de manera específica al biogás generado en plantas de tratamiento de aguas residuales, este puede ubicarse dentro de categorías más amplias, como biomasa, energías renovables, fuentes no convencionales o recursos energéticos renovables. El análisis que sigue revisa el encuadre jurídico aplicable en países seleccionados de América Latina.

1. Bolivia

En Bolivia, el marco jurídico evidencia una orientación expresa hacia el desarrollo de energías alternativas renovables. La Constitución Política del Estado y la Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien establecen principios de aprovechamiento responsable de los recursos naturales, conservación ambiental y transformación progresiva de la matriz energética hacia fuentes renovables y más limpias. En este contexto, la generación de electricidad a partir del biogás de PTAR resulta compatible con la orientación normativa hacia fuentes alternativas y con la incorporación gradual de energías renovables al Sistema Interconectado Nacional.

La regulación eléctrica boliviana reconoce el acceso abierto a las redes de transmisión y distribución, siempre que se cumplan las condiciones técnicas y contractuales correspondientes. Además, diferencia entre generación, autoproducción y generación distribuida. Esta última opera con fuentes renovables y se clasifica según escalas de potencia —nanogeneración, microgeneración y minigeneración—, lo que permite ubicar proyectos pequeños o medianos de recuperación energética del biogás de PTAR dentro de esquemas regulados. Asimismo, las instalaciones de producción o autoproducción con potencia nominal inferior a 2 MW no requerirían concesión ni licencia, lo que reduce costos de transacción para proyectos de menor escala.

2. Colombia

En Colombia, el marco jurídico aplicable se sustenta en las leyes 142 y 143 de 1994, que estructuraron el régimen de servicios públicos y del sector eléctrico, así como en la Ley 697 de 2001, la Ley 1715 de 2014 y la Ley 2099 de 2021, orientadas a promover el uso racional y eficiente de la energía y la integración de fuentes no convencionales. La Ley 1715 declaró de utilidad pública e interés social el desarrollo y aprovechamiento de fuentes no convencionales de energía, especialmente renovables, y estableció instrumentos para promover la autogeneración, la generación distribuida y la entrega de excedentes.

Aunque la normativa colombiana no menciona de forma específica el biogás de PTAR, esta fuente puede entenderse incluida dentro de la biomasa, definida como energía obtenida a partir de la degradación de materia orgánica. Por tanto, la recuperación energética del biogás producido en PTAR se encuentra respaldada por el marco legal vigente. Adicionalmente, la regulación reconoce el principio de acceso a las redes, condicionado al cumplimiento de requisitos técnicos y económicos definidos por la regulación, lo que permite estructurar proyectos bajo esquemas de generación, autogeneración o generación distribuida.

3. Costa Rica

En Costa Rica, el marco institucional del sector eléctrico está conformado principalmente por el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). El país presenta una orientación histórica hacia la generación renovable y cuenta con normas que regulan la generación privada, la generación autónoma o paralela, la generación distribuida para autoconsumo y los recursos energéticos distribuidos.

La regulación costarricense reconoce fuentes renovables sujetas a procesos de reposición natural, dentro de las cuales se incluye la biomasa. Asimismo, el marco regulatorio garantiza el acceso al Sistema Eléctrico Nacional cuando se cumplen las condiciones técnicas, comerciales y contractuales establecidas. En este contexto, la generación eléctrica a partir del biogás producido en PTAR tiene cabida jurídica, ya sea bajo esquemas de generación autónoma o paralela, generación distribuida para autoconsumo o venta de excedentes, dependiendo de la escala del proyecto y de las condiciones de interconexión.

4. México

En México, la recuperación energética del biogás de PTAR se enmarca en la regulación de la transición energética, la Ley de la Industria Eléctrica, la Ley General de Cambio Climático y la Ley de Transición Energética. Estas normas impulsan la reducción de emisiones, la diversificación de la matriz energética y el uso de energías limpias. El biogás puede vincularse a la categoría de energías limpias, lo que abre la posibilidad de desarrollar proyectos de generación eléctrica asociados a PTAR.

La regulación mexicana permite distintas modalidades de participación, como generación, abasto aislado, generación distribuida y venta de excedentes. En particular, el esquema de generación distribuida tiene límites de capacidad y condiciones de interconexión, mientras que proyectos de mayor escala podrían participar en el mercado eléctrico mayorista o mediante contratos bilaterales. De esta forma, el marco jurídico permite la recuperación energética del biogás, aunque su viabilidad dependerá de la escala del proyecto, su capacidad de conexión y los ingresos derivados de la venta de energía y de instrumentos asociados a energías limpias.

5. Perú

En Perú, el marco jurídico se apoya en la Política Energética Nacional, las normas de promoción de recursos energéticos renovables y las disposiciones sobre generación distribuida y cogeneración. La regulación reconoce los recursos energéticos renovables y establece mecanismos para promover su participación en la matriz eléctrica, principalmente mediante subastas y tarifas de adjudicación.

La recuperación energética del biogás en PTAR puede encuadrarse dentro de los recursos energéticos renovables, y eventualmente bajo esquemas de generación distribuida o autoproducción. Sin embargo, en el caso peruano se identifica una limitación relevante: la implementación plena de la generación distribuida depende de la aprobación de una regulación específica. Por tanto, aunque existe una base jurídica favorable para el aprovechamiento del biogás, algunos mecanismos requieren mayor desarrollo normativo para su aplicación efectiva.

6. Síntesis del encuadre jurídico del aprovechamiento energético del biogás en PTAR

El análisis comparado muestra que los países seleccionados cuentan con bases jurídicas que permiten encuadrar el aprovechamiento energético del biogás dentro de categorías ya reconocidas por la regulación energética, tales como biomasa, fuentes renovables, fuentes no convencionales, recursos energéticos renovables, autogeneración, autoproducción o generación distribuida. Sin embargo, la amplitud de ese encuadre y las condiciones para su aplicación varían entre países, especialmente en lo relativo a escala de los proyectos, requisitos de autorización, acceso a red y posibilidades de entrega de excedentes. El cuadro 1 resume el encuadre jurídico principal identificado y su lectura para proyectos asociados a plantas de tratamiento de aguas residuales.

Cuadro 1
Síntesis del encuadre jurídico del aprovechamiento energético del biogás en PTAR

País	Encuadre jurídico principal	Lectura para proyectos de PTAR
Bolivia (Estado Plurinacional de)	Energías alternativas renovables, autoproducción y generación distribuida.	Existe cabida jurídica; proyectos menores pueden reducir cargas de autorización según potencia.
Colombia	FNCE/FNCER, biomasa, autogeneración y generación distribuida.	El biogás de PTAR puede asimilarse a biomasa y acogerse a incentivos y esquemas de entrega de excedentes.
Costa Rica	Fuentes renovables, generación autónoma o paralela y generación distribuida para autoconsumo.	El biogás puede desarrollarse como fuente renovable bajo esquemas de interconexión y venta de excedentes.
México	Energías limpias, abasto aislado, generación distribuida y mercado eléctrico.	Los proyectos pueden vender energía o participar en mecanismos asociados a energías limpias, según escala.
Perú	Recursos energéticos renovables, subastas RER y generación distribuida en desarrollo.	Existe base jurídica, pero algunos mecanismos requieren reglamentación específica para operar plenamente.

Fuente: Elaboración propia con base en Saravia Matus et al. (2024), CEPAL, LC/TS.2024/39.

B. Incentivos y mecanismos de remuneración para el aprovechamiento energético del biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales

Además del encuadre jurídico general, la viabilidad de los proyectos de aprovechamiento energético del biogás depende de los incentivos y mecanismos de remuneración disponibles. Estos instrumentos permiten determinar si la energía generada puede traducirse en ahorros, ingresos o beneficios económicos para los prestadores. En términos generales, pueden distinguirse dos tipos de mecanismos: por una parte, aquellos orientados a promover la generación con fuentes renovables, como subastas, precios regulados, primas, contratos o certificados; y, por otra, aquellos asociados al autoconsumo, la autogeneración, la cogeneración o la generación distribuida, mediante los cuales la energía producida puede utilizarse dentro de la propia instalación, compensarse contra la factura eléctrica o, cuando la regulación lo permite, venderse como excedente.

1. Bolivia

En Bolivia, la generación de electricidad a partir de energías alternativas en el Sistema Interconectado Nacional puede recibir un precio de generación aprobado por el regulador, asignado mediante la aplicación de un factor de adaptabilidad al precio de nodo de energía. Este mecanismo permite reconocer condiciones particulares de generación renovable.

Para las PTAR, también resulta relevante la figura de autoprodutor, que permite reducir la factura energética mediante autoconsumo y, bajo condiciones específicas, vender excedentes a través de un agente del mercado. La generación distribuida, por su parte, contempla una compensación diferenciada según el nivel de demanda del generador distribuido. Cuando la demanda mensual supera determinados umbrales, la energía inyectada se valora con referencia al precio de nodo de energía ponderado vigente; en demandas menores, la compensación opera mediante la diferencia entre energía consumida e inyectada, valorada con cargos tarifarios aplicables.

2. Colombia

En Colombia, las PTAR podrían desarrollar proyectos bajo tres figuras: generación, autogeneración o generación distribuida. La generación puede participar en el mercado de energía mayorista según su capacidad instalada, mediante venta en bolsa, contratos bilaterales o mecanismos de subasta para fuentes no convencionales. Sin embargo, algunos mecanismos de subasta exigen capacidades mínimas que podrían excluir proyectos de menor escala.

La autogeneración permite atender la demanda propia y entregar excedentes a la red. En pequeña escala, los excedentes pueden ser reconocidos como créditos de energía o valorados al precio de bolsa horario, mientras que en gran escala se requiere representación por un agente del mercado. La generación distribuida, definida para plantas menores a 1 MW ubicadas cerca de centros de consumo y conectadas al sistema de distribución local, cuenta con un incentivo adicional: la posibilidad de vender energía al comercializador integrado con el operador de red, recibiendo el precio de bolsa más un reconocimiento por los beneficios causados al sistema de distribución.

3. Costa Rica

En Costa Rica, la recuperación energética del biogás de PTAR podría acogerse a esquemas de generación autónoma o paralela, generación bajo régimen de competencia o generación distribuida para autoconsumo con medición neta completa. En la generación autónoma o paralela, el ICE puede comprar los excedentes de electricidad a tarifas fijadas por la ARESEP y mediante contratos de duración definida.

En la modalidad de generación bajo régimen de competencia, los precios de compra se determinan mediante licitación pública, lo que permite incorporar competencia en la definición de precios. La generación distribuida para autoconsumo con medición neta completa también puede permitir la venta de excedentes, aunque otros esquemas, como la medición neta sencilla, funcionan más como mecanismos de depósito y devolución de energía, sin generar una remuneración económica directa.

4. México

En México, los proyectos de aprovechamiento energético del biogás de PTAR podrían participar mediante generación, abasto aislado o generación distribuida, dependiendo de su escala y de la forma de consumo o entrega de excedentes. Los proyectos con capacidad suficiente pueden participar en el mercado eléctrico mayorista o suscribir contratos bilaterales.

Adicionalmente, los proyectos de energías limpias pueden obtener ingresos asociados a Certificados de Energías Limpias. Sin embargo, a diferencia de otros mecanismos basados en tarifas o primas garantizadas, este instrumento introduce mayor incertidumbre, dado que el valor de los certificados depende de condiciones de mercado y no garantiza un ingreso mínimo estable durante toda la vida del proyecto.

5. Perú

En Perú, el principal mecanismo de promoción de recursos energéticos renovables se basa en subastas que definen una tarifa de adjudicación para los proyectos ganadores. Cuando los ingresos obtenidos en el mercado no alcanzan dicha tarifa, se reconoce una prima o complemento, lo que mejora la previsibilidad de los ingresos del activo renovable.

La generación distribuida y la autoproducción podrían ser alternativas relevantes para PTAR que busquen autoconsumir la energía generada e inyectar excedentes a la red. Sin embargo, la aplicación plena de estos esquemas depende de la aprobación y desarrollo de la regulación específica. En consecuencia, aunque el marco general es favorable, existen barreras regulatorias que pueden limitar la implementación inmediata de proyectos de aprovechamiento energético del biogás.

6. Síntesis de incentivos y mecanismos de remuneración identificados

La revisión comparada muestra que los incentivos y mecanismos de remuneración son determinantes para transformar el potencial energético del biogás en proyectos implementables. La posibilidad de autoconsumir energía, compensar excedentes, vender electricidad o acceder a esquemas de promoción de energías renovables incide directamente en la viabilidad económica de las inversiones. Esta dimensión resulta especialmente relevante para evaluar carteras de plantas de tratamiento de aguas residuales, como se analiza en el siguiente capítulo a partir del caso de Colombia. El cuadro 2 sintetiza los principales mecanismos identificados y su relevancia para proyectos de aprovechamiento energético del biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Cuadro 2
Síntesis de incentivos y mecanismos de remuneración identificados

País	Mecanismos principales	Observación para PTAR
Bolivia (Estado Plurinacional de)	Precio de generación ajustado al precio de nodo; autoproducción; compensación de generación distribuida.	Adecuado para proyectos con autoconsumo y venta limitada de excedentes según potencia y demanda.
Colombia	Bolsa, contratos bilaterales, subastas, créditos de energía, precio de bolsa y prima por beneficios a la red.	Marco amplio y flexible, especialmente relevante para autogeneración y generación distribuida.
Costa Rica	Tarifas ARESEP, compra por ICE, licitaciones y medición neta completa.	Permite venta de excedentes en ciertos esquemas; la medición neta sencilla no remunera directamente.
México	Mercado mayorista, contratos bilaterales, abasto aislado, generación distribuida y Certificados de Energías Limpias.	Mayor exposición al mercado; los CEL complementan ingresos, pero no garantizan precio estable.
Perú	Subastas RER, tarifa de adjudicación, prima complementaria y posible generación distribuida.	El esquema de subastas ofrece certidumbre, pero la generación distribuida requiere desarrollo normativo.

Fuente: Elaboración propia con base en Saravia Matus et al. (2024), CEPAL, LC/TS.2024/39.

V. Caso aplicado: estimación del potencial energético del metano en PTAR en Colombia

El caso de Colombia permite aplicar de manera concreta el enfoque desarrollado en los capítulos anteriores sobre el potencial y viabilidad de aplicación de la economía circular en el uso y aprovechamiento energético en el sector de saneamiento. Así, a partir de una muestra de plantas de tratamiento de aguas residuales se estima el potencial de recuperación energética del metano, se valoran preliminarmente sus beneficios económicos y ambientales, y se identifica su relevancia para estructurar una cartera de oportunidades de inversión en el sector de saneamiento.

Este caso resulta especialmente pertinente porque conecta tres dimensiones centrales de la gestión energética integral. En primer lugar, muestra cómo la información operativa de las PTAR —caudales tratados, tecnologías utilizadas, carga orgánica, producción de lodos y condiciones de operación— puede utilizarse para estimar el metano recuperable y su potencial de generación energética. En segundo lugar, permite aproximar los beneficios económicos asociados a la sustitución de energía comprada, los costos de inversión y los períodos de recuperación. En tercer lugar, permite cuantificar beneficios ambientales, en particular la reducción de emisiones de metano y dióxido de carbono equivalente.

El análisis también ilustra la importancia de pasar de una mirada centrada en plantas individuales hacia una perspectiva de cartera de carácter nacional, viabilizando y potenciando su acceso a asistencia y financiamiento internacional subvencionado. Si bien el potencial de aprovechamiento energético varía según la escala, tecnología y condiciones operativas de cada instalación, la evaluación conjunta de un grupo de PTAR permite identificar patrones, priorizar intervenciones y orientar decisiones de política pública, regulación, financiamiento y asistencia técnica.

En este sentido, el caso colombiano no se presenta únicamente como un ejercicio de estimación técnica, sino como una aplicación práctica de la transición propuesta en este documento: avanzar desde el consumo energético del sector hacia la recuperación de energía a partir de sus propios procesos. La captura y aprovechamiento del metano en PTAR permite transformar un pasivo climático en una fuente de energía útil, con beneficios potenciales para la sostenibilidad financiera de los prestadores, la reducción de emisiones y la economía circular en el saneamiento.

El capítulo se organiza de la siguiente manera. En primer lugar, se presenta el alcance del caso de estudio y su vínculo con la asistencia técnica desarrollada entre Colombia y la CEPAL. En segundo lugar, se describe el proceso de consolidación de la muestra de PTAR analizadas. En tercer lugar, se caracterizan las plantas incluidas en el análisis. Posteriormente, se estiman el potencial de metano recuperable y la generación energética asociada. Finalmente, se presentan los resultados de la evaluación financiera preliminar, los impactos ambientales estimados y las principales lecciones del caso para su posible escalamiento en Colombia y otros países de la región.

A. Alcance del caso

En el marco del Memorando de Entendimiento suscrito en 2024 entre el Gobierno de Colombia —a través de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) y el Ministerio de Minas y Energía— y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), se viene desarrollando una asistencia técnica orientada a identificar oportunidades de aprovechamiento del metano generado en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), bajo un enfoque de economía circular.

El objetivo de esta asistencia técnica es aportar insumos técnicos, económicos y regulatorios para la consolidación de un programa nacional de captura y aprovechamiento del metano proveniente del tratamiento de aguas residuales municipales. Esta agenda se encuentra alineada con las prioridades del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, particularmente con la transición energética, la acción climática, la economía circular y el fortalecimiento de los servicios públicos domiciliarios.

Las actividades acordadas entre las entidades se concentran en cinco líneas de trabajo: i) evaluación técnica y económica del potencial de aprovechamiento del metano en PTAR municipales de capacidad mediana o intermedia; ii) análisis de prefactibilidad para un grupo de plantas piloto; iii) identificación de barreras, incentivos y ajustes regulatorios requeridos; iv) exploración de alternativas de financiamiento climático internacional; y v) análisis de la viabilidad de comunidades energéticas en las que el biogás pueda actuar como vector energético para usos térmicos o para generación eléctrica.

Con estos antecedentes, el caso de estudio se concentra en el análisis preliminar de 56 sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales. La muestra se consolidó a partir de información reportada por prestadores del servicio de alcantarillado a la CRA, información complementaria del Sistema Único de Información (SUI) administrado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), y validaciones técnicas desarrolladas de manera conjunta por la CRA y la CEPAL.

B. Consolidación de la muestra de PTAR

El proceso de consolidación de la muestra se desarrolló en tres etapas, a partir de información disponible en bases oficiales, reportes de prestadores y validaciones técnicas realizadas por la CRA y la CEPAL. La muestra no debe entenderse como un inventario exhaustivo de las PTAR del país, sino como una base técnica consolidada para realizar una estimación preliminar del potencial de recuperación energética del metano en sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales.

La primera etapa partió de una selección inicial de 98 sistemas de tratamiento municipal con capacidad inferior a 450 l/s, construida con base en información de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) y del Sistema Único de Información (SUI). Dado que se identificaron vacíos de información en variables esenciales —como caudal tratado, tecnología de tratamiento y parámetros de control operacional—, la CRA realizó una validación técnica durante el segundo semestre de 2024.

Posteriormente, entre julio y septiembre de 2024, la CRA y la CEPAL ajustaron el instrumento de recolección de información, compuesto por 67 preguntas agrupadas en cuatro áreas temáticas. El 31 de octubre de 2024, la CRA invitó a 65 prestadores del servicio público de alcantarillado, responsables de 83 PTAR con capacidades superiores a 45 l/s e inferiores a 500 l/s, a participar en el proyecto piloto CRA-CEPAL-MME sobre aprovechamiento de metano.

Durante marzo y abril de 2025 se recibieron encuestas completas de 14 PTAR. En una segunda etapa, entre julio y agosto de 2025, se aplicó una encuesta simplificada que permitió incorporar 19 PTAR adicionales. Finalmente, en septiembre de 2025 se complementó la muestra con 23 PTAR adicionales, seleccionadas a partir de la revisión de bases de datos oficiales y validaciones complementarias.

Como resultado, se obtuvo una muestra final de 56 PTAR localizadas en 15 departamentos, equivalente al 7,8% del total de PTAR reportadas para Colombia por la SSPD en 2020. El cuadro 3 resume la secuencia de consolidación de información utilizada para conformar la muestra analizada.

Cuadro 3
Secuencia de consolidación de información de la muestra de PTAR

Etapas de recolección de información	Número de PTAR cubiertas	Total de PTAR en Colombia (En porcentajes)
Primera etapa: encuesta inicial CRA-CEPAL	14	1,9
Segunda etapa: encuesta simplificada CRA-CEPAL	19	2,6
Complementación: nuevas PTAR con información SUI validada por CRA	23	3,2
Total, muestra consolidada	56	7,8

Fuente: Elaboración propia con base en información consolidada por CRA-CEPAL.

C. Caracterización de las PTAR analizadas

La muestra final está conformada por 56 PTAR ubicadas en 15 departamentos del país. En conjunto, estas plantas cuentan con una capacidad instalada de 10.337 l/s, tratan un caudal aproximado de 6.354 l/s y atienden a una población estimada cercana a 3,7 millones de habitantes. Estos datos permiten dimensionar la escala operativa de la muestra y su relevancia para evaluar oportunidades de recuperación energética en el tratamiento de aguas residuales municipales.

Desde el punto de vista tecnológico, predominan las plantas con tratamiento aerobio: 38 sistemas, que representan el 76% del caudal tratado. Las 18 PTAR restantes emplean tecnologías anaerobias y concentran el 24% del caudal tratado. Esta composición es relevante porque el potencial de recuperación energética del metano depende tanto del caudal tratado como del tipo de tecnología, la carga orgánica, el manejo de lodos y las condiciones de captura y aprovechamiento del biogás.

En términos territoriales, la muestra incluye PTAR de las regiones Andina, Caribe y Orinoquía. La región Andina concentra la mayor participación del potencial estimado de metano, seguida por la región Caribe y, en menor proporción, por la Orinoquía. Esta distribución territorial permite identificar zonas donde podrían priorizarse análisis de prefactibilidad, asistencia técnica o esquemas de financiamiento para proyectos de aprovechamiento energético. El cuadro 4 resume la caracterización de la muestra según tipo de tecnología, localización principal y mensaje clave para el análisis del potencial de recuperación energética.

Cuadro 4
Caracterización de la muestra por tipo de tecnología

Tipo de tecnología	Tecnología específica	Número de PTAR	Localización principal	Mensaje clave
Aerobia	Lodos Activados Convencionales (LAC)	11	Andina, Caribe y Orinoquía	Incluye sistemas centralizados con digestión de lodos en algunos casos.
Aerobia	Filtros percoladores	7	Valle, Casanare, Meta y Quindío	Sistemas con potencial asociado principalmente al manejo de lodos.
Aerobia	Lagunas aireadas	2	Cundinamarca y Atlántico	Sistemas lagunares con aireación y otras unidades complementarias.
Aerobia	Lagunas facultativas	18	Córdoba, Atlántico, Arauca, Casanare, Cundinamarca y otros	Representan el mayor volumen de metano recuperable dentro de las tecnologías específicas.
Anaerobia	RAFA/UASB	13	Antioquia, Tolima, Boyacá, Cundinamarca y Valle	Tecnología directamente asociada a procesos anaerobios y recuperación de biogás.
Anaerobia	Lagunas anaerobias + otras lagunas	5	Antioquia, Atlántico, Arauca y Cauca	Sistemas con potencial de captura en unidades anaerobias.
Total	Todas las tecnologías	56	15 departamentos	Capacidad instalada total: 10.337 l/s; caudal tratado: 6.354 l/s.

Fuente: Elaboración propia con base en información consolidada por CRA-CEPAL.

D. Estimación del potencial de metano y generación energética

Con base en la información técnica disponible y mediante la aplicación de la Calculadora de Metano desarrollada por la CEPAL, se estimó el potencial de generación y recuperación de metano para cada una de las 56 PTAR analizadas. Esta estimación permite aproximar el volumen de metano recuperable, la energía eléctrica potencialmente generable y la distribución territorial y tecnológica de las oportunidades identificadas.

Para el conjunto de la muestra, el potencial total de metano recuperable asciende a cerca de 20,1 millones de m³ por año. Este volumen permitiría generar aproximadamente 70.903 MWh de energía eléctrica al año, cifra equivalente al consumo anual estimado de cerca de 47.000 habitantes. El resultado evidencia que el aprovechamiento del metano no solo representa una oportunidad ambiental, sino también una alternativa concreta para reducir costos de energía en los sistemas de saneamiento y fortalecer la sostenibilidad financiera de los prestadores.

La distribución territorial del potencial muestra una concentración relevante en la región Andina, que representa cerca del 60% del metano recuperable estimado, seguida de la región Caribe, con aproximadamente el 25%. Por departamento, las mayores participaciones se observan en Cundinamarca, Antioquia, Córdoba, Valle del Cauca, Atlántico y Casanare. Esta concentración territorial permite identificar zonas donde podrían priorizarse estudios de prefactibilidad, asistencia técnica, estructuración de proyectos y búsqueda de financiamiento. El cuadro 5 presenta el metano recuperable estimado por región y departamento para la muestra analizada.

Desde el punto de vista tecnológico, el potencial recuperable se distribuye entre sistemas anaerobios y aerobios. En las tecnologías anaerobias, el metano se asocia directamente con los procesos de degradación anaerobia de la materia orgánica. En las tecnologías aerobias, el potencial de recuperación se vincula principalmente con la digestión anaerobia de los lodos generados durante el tratamiento. Esta distinción es relevante porque las estrategias de aprovechamiento energético pueden variar según la tecnología existente y la necesidad de incorporar infraestructura adicional para captura, tratamiento y uso del biogás. El cuadro 6 muestra el metano recuperable estimado por tipo de tecnología de tratamiento.

Cuadro 5
Metano recuperable estimado por región y departamento

Región	Departamento	Metano recuperable (En miles de m³/año)	Participación estimada (En porcentajes)
Andina	Antioquia	2 895	14,4
Andina	Boyacá	1 291	6,4
Andina	Cauca	403	2,0
Andina	Cundinamarca	3 353	16,7
Andina	Santander	585	2,9
Andina	Tolima	936	4,7
Andina	Quindío	710	3,5
Andina	Valle	1 894	9,4
Caribe	Atlántico	1 827	9,1
Caribe	Bolívar	411	2,0
Caribe	Córdoba	2 419	12,0
Caribe	Magdalena	403	2,0
Orinoquía	Arauca	819	4,1
Orinoquía	Meta	393	2,0
Orinoquía	Casanare	1 776	8,8
Total	15 departamentos	20 115	100,0

Fuente: Elaboración propia con base en la Calculadora de Metano CEPAL y la muestra de 56 PTAR.

Cuadro 6
Metano recuperable por tipo de tecnología de tratamiento

Tipo de tratamiento	Tecnología específica	Metano recuperable (En miles de m³/año)	Participación (En porcentajes)
Anaerobia	Laguna anaerobia + otras lagunas	2 296	11
Anaerobia	RAFA/UASB	3 710	19
Aerobia	Lodos activados convencionales (LAC)	3 509	17
Aerobia	Filtros percoladores	3 690	18
Aerobia	Lagunas facultativas + otros	6 162	31
Aerobia	Laguna aireada + otras lagunas	749	4
Total	Todas las tecnologías	20 115	100

Fuente: Elaboración propia con base en información consolidada por CRA-CEPAL.

Estos resultados muestran que el potencial de recuperación energética no se limita a una sola tecnología o región. Si bien las tecnologías anaerobias presentan una relación más directa con la generación de biogás, los sistemas aerobios también pueden ofrecer oportunidades relevantes cuando se considera el manejo y digestión de lodos. Por ello, la identificación de proyectos potenciales debe combinar el análisis de caudales, tecnología, carga orgánica, producción de lodos, demanda energética de la planta y condiciones de operación.

En términos de gestión sectorial, la estimación del potencial de metano constituye un primer insumo para priorizar intervenciones. Permite identificar plantas o grupos de plantas con mayor potencial energético, orientar análisis de prefactibilidad, estimar beneficios económicos y ambientales, y evaluar posibles esquemas de financiamiento. La siguiente sección presenta una evaluación financiera preliminar de estas oportunidades, considerando los ahorros potenciales por sustitución de energía eléctrica y la inversión requerida para el aprovechamiento energético del metano.

E. Evaluación financiera preliminar del aprovechamiento energético

La evaluación financiera preliminar considera los beneficios económicos derivados del ahorro en la compra de energía eléctrica, bajo el supuesto de que la energía generada a partir del biogás se utiliza principalmente para atender consumos propios de las PTAR. En los sistemas anaerobios, el biogás proviene del proceso de tratamiento de las aguas residuales; en los sistemas aerobios, el potencial se asocia principalmente con la digestión anaerobia de los lodos generados durante el tratamiento.

Para el conjunto de las 56 PTAR evaluadas, los ahorros anuales potenciales por sustitución de energía eléctrica se estiman en USD 17,6 millones. La inversión total preliminar requerida para el aprovechamiento energético del metano se estima en USD 55,2 millones. Estos resultados muestran que el metano recuperable puede traducirse en una oportunidad económica concreta para los prestadores, especialmente cuando la energía generada se destina a reducir la factura eléctrica de las plantas.

Bajo los supuestos aplicados, solo una PTAR presenta resultados económicos desfavorables, explicados por su bajo caudal tratado y por mayores inversiones relativas asociadas a su tecnología de tratamiento. En los demás casos, los resultados preliminares son favorables, con períodos de recuperación de la inversión que, en términos generales, se ubican entre dos y siete años. Esta variabilidad confirma la importancia de evaluar cada planta según su escala, tecnología, caudal tratado, demanda energética, costos de inversión y condiciones operativas. El cuadro 7 sintetiza los principales resultados de la evaluación económica preliminar para la muestra analizada.

Cuadro 7
Síntesis de la evaluación económica preliminar

Indicador	Resultado estimado	Mensaje de interpretación
Muestra analizada	56 PTAR	Sistemas ubicados en 15 departamentos del país
Potencial de metano recuperable	20,1 millones m ³ /año	Base para generación de energía eléctrica y reducción de emisiones
Energía eléctrica generable	70.903 MWh/año	Equivalente al consumo anual estimado de cerca de 47.000 habitantes
Ahorros anuales por energía	USD 17,6 millones/año	Ahorros por sustitución de energía comprada a la red
Inversión estimada	USD 55,2 millones	Valor total preliminar asociado al aprovechamiento del metano
Emisiones evitadas	113,8 millones kg CO ₂ /año	Equivalente aproximado a 113.799 tCO ₂ /año
Ahorros por costo social del carbono	USD 8,5 millones/año	Beneficio ambiental monetizado bajo los supuestos aplicados
Resultado general	55 de 56 PTAR con indicadores favorables	El caso desfavorable corresponde a Andes, por bajo caudal tratado y mayores inversiones relativas
Rango de recuperación de inversión	Aproximadamente 2 a 7 años	Para las PTAR con resultados económicos favorables

Fuente: Elaboración propia con base en información consolidada por CRA-CEPAL.

Estos resultados sugieren que el aprovechamiento energético del metano puede contribuir a mejorar la sostenibilidad financiera de los prestadores de saneamiento, especialmente cuando se articula con estrategias de eficiencia energética, reducción de emisiones y financiamiento climático. No obstante, se trata de una evaluación preliminar. La estructuración de proyectos específicos requerirá análisis de prefactibilidad que consideren ingeniería de detalle, condiciones de operación, costos de mantenimiento, requisitos de conexión, capacidades del prestador y alternativas regulatorias para el autoconsumo o eventual entrega de excedentes.

En consecuencia, la evaluación financiera no debe interpretarse únicamente como una estimación de rentabilidad individual por planta, sino como un insumo para priorizar una cartera de oportunidades. Las PTAR con mayores ahorros potenciales, menores períodos de recuperación y mayores beneficios ambientales podrían ser candidatas para estudios más detallados, asistencia técnica, estructuración financiera y búsqueda de mecanismos de financiamiento climático o inversión pública.

F. Impactos ambientales asociados

El aprovechamiento energético del metano generado en PTAR tiene una dimensión ambiental especialmente relevante. El metano es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global considerablemente superior al del dióxido de carbono. Por ello, su captura y aprovechamiento permite reducir emisiones directas asociadas al tratamiento de aguas residuales y, al mismo tiempo, sustituir parte de la energía eléctrica comprada a la red.

Para la muestra analizada, el aprovechamiento del metano permitiría evitar aproximadamente 113,8 millones de kg de CO₂ equivalente al año, equivalentes a cerca de 113.799 toneladas de CO₂ equivalente anuales. Este resultado muestra que el tratamiento de aguas residuales puede contribuir a las estrategias nacionales de mitigación climática cuando incorpora mecanismos de captura, control y aprovechamiento energético del biogás.

Los beneficios ambientales no se limitan a la reducción de emisiones directas de metano. Al generar energía eléctrica a partir del biogás, las PTAR pueden reducir parcialmente su dependencia de energía comprada, lo que también contribuye a disminuir emisiones indirectas asociadas al consumo eléctrico, dependiendo de la matriz energética del sistema al que estén conectadas. En este sentido, el aprovechamiento del metano combina mitigación climática, eficiencia energética y economía circular.

La monetización preliminar del beneficio ambiental, utilizando el costo social del carbono bajo los supuestos aplicados, permite estimar un valor aproximado de USD 8,5 millones anuales por emisiones evitadas. Este resultado no sustituye la evaluación financiera basada en ahorros energéticos, pero permite visibilizar beneficios adicionales que podrían ser relevantes para instrumentos de financiamiento climático, programas de reducción de emisiones o esquemas de apoyo a inversiones sostenibles.

Desde una perspectiva de economía circular, el resultado más importante es que el metano deja de ser tratado únicamente como una externalidad ambiental del saneamiento. Cuando se captura y aprovecha, puede convertirse en una fuente de energía útil para la propia operación de las plantas. Esta transformación permite integrar la gestión de aguas residuales con objetivos más amplios de reducción de emisiones, eficiencia energética, valorización de subproductos y sostenibilidad financiera de los prestadores.

Estos impactos ambientales deben interpretarse como estimaciones preliminares. Su materialización dependerá de la implementación efectiva de sistemas de captura y aprovechamiento de biogás, del desempeño operativo de las plantas, de la continuidad del tratamiento, de la calidad de la información disponible y de la capacidad para monitorear, reportar y verificar las emisiones evitadas. Por ello, los proyectos específicos deberán incorporar sistemas de medición y seguimiento ambiental que permitan verificar los beneficios estimados y sustentar su eventual acceso a financiamiento climático.

G. Lecciones del caso colombiano para la región

El caso colombiano muestra que el aprovechamiento energético del metano en PTAR puede pasar de ser una oportunidad conceptual a una cartera preliminar de proyectos evaluables. La estimación realizada permite identificar plantas con mayor potencial de recuperación energética, aproximar beneficios económicos y ambientales, y generar insumos para priorizar estudios de prefactibilidad, asistencia técnica y estructuración de inversiones.

Una primera lección es la importancia de contar con información operativa suficiente y validada. Variables como caudal tratado, tecnología de tratamiento, carga orgánica, producción de lodos, condiciones de operación y consumo energético son determinantes para estimar el metano recuperable y la energía potencialmente generable. Sin esta información, el potencial de recuperación energética puede quedar invisibilizado o ser estimado con altos niveles de incertidumbre.

Una segunda lección es que el potencial energético debe analizarse desde una perspectiva de cartera. No todas las PTAR presentan las mismas condiciones técnicas, económicas u operativas, pero la evaluación conjunta permite identificar patrones, concentraciones territoriales, tecnologías con mayor potencial y plantas que podrían ser priorizadas para análisis más detallados. Este enfoque facilita pasar de intervenciones aisladas a programas nacionales o subnacionales de aprovechamiento energético en saneamiento.

Una tercera lección es que la viabilidad de estas oportunidades no depende únicamente del volumen de metano recuperable. También requiere capacidades técnicas para operar y mantener los sistemas, condiciones regulatorias para autoconsumir o valorizar la energía generada, mecanismos de financiamiento adecuados y sistemas de seguimiento que permitan verificar ahorros, generación energética y emisiones evitadas.

Finalmente, el caso evidencia que el aprovechamiento del metano puede contribuir simultáneamente a varios objetivos de política pública: mejorar la sostenibilidad financiera de los prestadores, reducir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), fortalecer la economía circular en el saneamiento y apoyar la transición energética. En este sentido, la experiencia colombiana ofrece una base útil para otros países de América Latina y el Caribe interesados en identificar oportunidades similares a partir de sus propios sistemas de tratamiento de aguas residuales.

VI. Conclusiones

El documento muestra que el sector de agua y saneamiento enfrenta una doble agenda energética. Por una parte, debe mejorar la eficiencia y reducir la intensidad energética de sus operaciones, especialmente en procesos de bombeo, distribución, aireación, tratamiento de aguas residuales y manejo de lodos. Por otra, puede avanzar hacia la recuperación y generación de energía a partir de sus propios procesos, en particular mediante el aprovechamiento del metano generado en el tratamiento de aguas residuales. Esta doble condición permite dejar atrás una visión limitada del sector como consumidor de energía y avanzar hacia una mirada más amplia, en la que el agua y el saneamiento también pueden contribuir a la transición energética y a la economía circular.

Las auditorías energéticas constituyen una herramienta clave para hacer operativa esta agenda. Su aporte no se limita a medir consumos o identificar equipos ineficientes. Permiten analizar el desempeño energético de instalaciones, procesos y sistemas; localizar pérdidas eléctricas, mecánicas e hidráulicas; identificar oportunidades de optimización operativa; estimar ahorros potenciales; evaluar inversiones requeridas; y construir carteras de medidas priorizadas. En este sentido, las auditorías energéticas ayudan a transformar diagnósticos generales en decisiones concretas de gestión, inversión y seguimiento.

Las oportunidades de mejora identificadas en el documento muestran que existen medidas de distinta escala y complejidad. Algunas pueden implementarse en el corto plazo mediante ajustes operativos, manejo de carga, mantenimiento preventivo, reducción de pérdidas, regulación de presiones o mejoras en la gestión de datos. Otras requieren inversiones en tecnologías eficientes, como variadores de frecuencia, motores y bombas de mayor eficiencia, sistemas de automatización, control y medición de implementación en el mediano plazo. A ellas se suman alternativas de generación y recuperación energética, como la energía solar fotovoltaica y, de manera especialmente relevante, el aprovechamiento energético del metano.

El metano generado en el tratamiento de aguas residuales resume con claridad el cambio de enfoque propuesto. Cuando se libera a la atmósfera, constituye un pasivo climático. Cuando se captura y aprovecha, puede convertirse en biogás para generar energía eléctrica o térmica, reducir costos operativos, disminuir emisiones y fortalecer la sostenibilidad financiera de los prestadores. Esta transformación convierte al saneamiento en un espacio de recuperación de recursos y permite vincular eficiencia energética, acción climática, economía circular y financiamiento sostenible.

No obstante, el potencial técnico no se traduce automáticamente en proyectos implementables. El análisis regulatorio muestra que la recuperación energética del biogás requiere marcos jurídicos e incentivos que permitan utilizar, compensar o remunerar la energía generada. La posibilidad de autoconsumir energía, entregar excedentes, acceder a mecanismos de generación distribuida, participar en esquemas de autogeneración o acogerse a incentivos para fuentes renovables puede incidir de manera decisiva en la viabilidad económica de las inversiones. Por ello, la coordinación entre regulación de agua, energía, ambiente y cambio climático resulta fundamental.

El caso aplicado de Colombia muestra que esta agenda puede aterrizar en estimaciones concretas. La muestra analizada de 56 PTAR permite identificar un potencial recuperable de metano, estimar energía generable, calcular ahorros por sustitución de energía comprada, aproximar inversiones requeridas y cuantificar emisiones evitadas. Los resultados muestran que el aprovechamiento energético del metano puede constituir una oportunidad relevante para estructurar carteras de proyectos, priorizar estudios de prefactibilidad y orientar decisiones de política pública, regulación, asistencia técnica y financiamiento.

Una lección central del caso colombiano es la importancia de contar con información operativa suficiente y validada. Variables como caudal tratado, tecnología de tratamiento, carga orgánica, producción de lodos, consumo energético y condiciones de operación son indispensables para estimar el potencial de recuperación energética y reducir la incertidumbre en la toma de decisiones. Sin información confiable, las oportunidades de eficiencia y aprovechamiento energético permanecen invisibles o no logran transformarse en proyectos financiables.

Otra lección relevante es la necesidad de trabajar con una lógica de cartera nacional. No todas las plantas presentan el mismo potencial, ni las mismas condiciones técnicas, económicas o regulatorias. Sin embargo, la evaluación conjunta de múltiples instalaciones permite identificar patrones, priorizar intervenciones, agrupar oportunidades, diseñar programas de apoyo y movilizar financiamiento con mayor escala. Esta aproximación resulta especialmente útil para países de la región que buscan avanzar en saneamiento, reducción de emisiones y transición energética de manera integrada.

En síntesis, avanzar del consumo energético a la recuperación de energía en agua y saneamiento requiere combinar diagnóstico técnico, gestión operativa, inversión, regulación e información. La eficiencia energética permite reducir costos y mejorar el desempeño de los sistemas existentes; la recuperación del metano permite convertir un subproducto del saneamiento en un activo energético; y los marcos regulatorios adecuados permiten transformar ese potencial en valor para los prestadores y para la sociedad. En este sentido, la gestión energética integral del sector constituye una oportunidad concreta para fortalecer la sostenibilidad financiera, climática y operativa de los servicios de agua y saneamiento en América Latina y el Caribe.

Bibliografía

- Aula 21. (s. f.). *Variadores de frecuencia: definición, funcionamiento y aplicaciones*. Aula 21.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2011). *Evaluación para sistemas de bombeo de agua*. BID.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2015). *Eficiencia energética y regulación económica en los servicios de agua potable y alcantarillado*. CEPAL.
- _____. (2023). *Inversiones transformadoras para avanzar hacia el cumplimiento del ODS 6 en América Latina y el Caribe*. CEPAL.
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). (s. f.). *Sistemas de control y gestión de datos para la operación de infraestructura de acueducto y alcantarillado*. EAAB.
- Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP). (2012). *A primer on energy efficiency for municipal water and wastewater utilities*. World Bank.
- Energética Hoy. (2021). *Sistemas de gestión de la energía y ciclo de mejora continua*. Energética Hoy.
- Global Water Intelligence (GWI). (2022). *Global water market and energy data*. Global Water Intelligence.
- GlobalPetrolPrices.com. (2022). *Electricity prices*. GlobalPetrolPrices.com.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Institute for Global Environmental Strategies.
- _____. (2019). *2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. IPCC.
- International Organization for Standardization (ISO). (2011). *ISO 50001:2011: Energy management systems — Requirements with guidance for use*. ISO.
- _____. (2014). *ISO 50002:2014: Energy audits — Requirements with guidance for use*. ISO.
- _____. (2018). *ISO 50001:2018: Energy management systems — Requirements with guidance for use*. ISO.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2025). *Renewable power generation costs in 2024*. IRENA.
- Limaye, D. R., & Welsien, K. (2019). *Mainstreaming energy efficiency investments in urban water and wastewater utilities*. World Bank.
- Liu, F., Ouedraogo, A., Manghee, S., & Danilenko, A. (2012). *A primer on energy efficiency for municipal water and wastewater utilities*. Energy Sector Management Assistance Program; World Bank.
- López, C., Rodríguez, J., & otros. (2017). *Aprovechamiento energético y gestión de lodos en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Documento técnico.
- Ministerio de Ambiente y Energía de El Salvador & Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA). (2020). *Proyectos de eficiencia energética y generación renovable en sistemas de agua y saneamiento*. ANDA.

- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021a). *Guía para el desarrollo de auditorías de eficiencia energética y operativa en sistemas de tratamiento de agua*. Gobierno de Colombia.
- _____. (2021b). *Guía para la optimización energética en sistemas de tratamiento de agua*. Gobierno de Colombia.
- Saravia Matus, S., de la Hoz, J., Fernández, D., Llavona, A., Martín, H., Montañez, A., Naranjo, L., & Sarmanto, N. (2024). *Incentivos y oportunidades en el marco regulatorio para el aprovechamiento energético del biogás producido en plantas de tratamiento de aguas residuales en países seleccionados de América Latina y el Caribe*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Serie Recursos Naturales y Desarrollo. LC/TS.2024/39.
- Saravia Matus, S., Gil Sevilla, M., Fernández, D., Montañez, A., Blanco, E., Fernández, D., Santos, A., Chavarro, P., Montañez, A., & Samanto, N. (2024). Hoja de ruta técnica y financiera para la recuperación de nutrientes de aguas residuales en América Latina y el Caribe (Serie Recursos Naturales y Desarrollo, N° 222, LC/TS.2024/39). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Saravia Matus, S., & Samanto, N. (2022). Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe (Serie Recursos Naturales y Desarrollo, N° 213, LC/TS.2022/193). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) & Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2021). *Análisis de oportunidades potenciales de eficiencia energética (EE) y energías renovables (ER) en los servicios de agua municipales en México*. SEMARNAT; INECC.
- United Nations World Water Assessment Programme (WWAP). (2014). *The United Nations World Water Development Report 2014: Water and energy*. UNESCO.



Serie

C E P A L

Recursos Naturales y Desarrollo

Números publicados

Un listado completo así como los archivos pdf están disponibles en
www.cepal.org/publicaciones

- 232. Del consumo energético a la recuperación de energía en el sector de agua y saneamiento en América Latina y el Caribe: auditorías energéticas y aprovechamiento del metano a partir de aguas residuales, Silvia Saravia Matus, Diego Fernández, Pedro Chavarro, Alfredo Montañez, Elizabeth Coble Fernández (LC/TS.2026/75), 2026.
- 231. Valoración del agua: reflexiones y recomendaciones para América Latina y el Caribe, Silvia Saravia Matus (Coord.) (LC/TS.2026/14), 2026.
- 230. Planes de transición energética en América Latina y el Caribe: guía metodológica, Pablo Carvajal, Rafael Poveda y Marina Gil (LC/TS.2026/8), 2026.
- 229. Marco de financiamiento para la seguridad hídrica en América Latina y el Caribe, Mónica A. Altamirano, Silvia L. Saravia Matus (LC/TS.2026/9/Rev.1), 2026.
- 228. Eficiencia energética en la transición sostenible e inclusiva de América Latina y el Caribe: progresos y políticas, Franco Carvajal, Marina Gil y Rafael Poveda (LC/TS.2025/61), 2025.
- 227. El litio, un recurso estratégico: gobernanza, redes globales de producción y sostenibilidad, 2023. Material de lectura del curso virtual, Pablo Chauvet, Mauricio León y Martín Obaya (LC/TS.2025/57), 2025.
- 226. Aprovechamiento energético del metano en el tratamiento de aguas residuales: casos de estudio en El Salvador, México y Panamá, Silvia Saravia Matus, Diego Fernández, Pedro Chavarro, Alfredo Montañez y Natalia Sarmanto (LC/TS.2024/143), 2024.
- 225. Bioeconomía para la diversificación productiva y la agregación de valor: biorrefinerías de residuos en cadenas agroindustriales en el Ecuador", Lourdes M. Orejuela-Escobar y Adrián G. Rodríguez (LC/TS.2024/130), 2024.
- 224. Incentivos y oportunidades en el marco regulatorio para el aprovechamiento energético del biogás producido en plantas de tratamiento de aguas residuales en países seleccionados de América Latina y el Caribe, Silvia Saravia Matus, Jordi de la Hoz, Diego Fernández, Alba Llavona, Helena Martín, Alfredo Montañez, Lisbeth Naranjo y Natalia Sarmanto (LC/TS.2024/39), 2024.
- 223. Perspectivas de desarrollo de las cadenas de valor relacionadas con el litio en Chile y América del Sur, Mario Castillo, Ingrid Garcés y Rodrigo Furtado Messias (LC/TS.2024/38), 2024.

RECURSOS NATURALES Y DESARROLLO

Números publicados:

- 232 Del consumo energético a la
recuperación de energía en el sector
de agua y saneamiento en América Latina
y el Caribe
Auditorías energéticas y aprovechamiento
del metano a partir de aguas residuales
*Silvia Saravia Matus, Diego Fernández,
Pedro Chavarro, Alfredo Montañez
y Elizabeth Coble Fernández*
- 231 Valoración del agua
Reflexiones y recomendaciones
para América Latina y el Caribe
Silvia Saravia Matus
- 230 Planes de transición energética
en América Latina y el Caribe
Guía metodológica
Pablo Carvajal, Rafael Poveda y Marina Gil



Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)
Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC)
www.cepal.org

Versión digital disponible online



<https://bit.ly/CEPAL2026-75S>