



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Gestión de Mercados Eléctricos Regulados

**IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN
HIDROELÉCTRICA AL CAUDAL DE SALIDA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO
MUNICIPAL DE SAN LUCAS SACATEPÉQUEZ**

Ing. Julio Estuardo Santa Cruz Márquez

Asesorado por M. Sc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

Guatemala, octubre de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN
HIDROELÉCTRICA AL CAUDAL DE SALIDA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO
MUNICIPAL DE SAN LUCAS SACATEPÉQUEZ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. JULIO ESTUARDO SANTA CRUZ MÁRQUEZ
ASESORADO POR M. SC. ING. GAMALIEL GIOVANNI ZAMBRANO RUANO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN GESTIÓN DE MERCADOS ELÉCTRICOS REGULADOS

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO a. i.	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO a. i.	Ing. José Francisco Gómez Rivera
EXAMINADOR	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Calos Boj
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN
HIDROELÉCTRICA AL CAUDAL DE SALIDA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO
MUNICIPAL DE SAN LUCAS SACATEPÉQUEZ**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 7 de noviembre de 2022.



Ing. Julio Estuardo Santa Cruz Márquez

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.700.2023

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA AL CAUDAL DE SALIDA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO MUNICIPAL DE SAN LUCAS SACATEPÉQUEZ**, presentado por: **Ing. Julio Estuardo Santa Cruz Márquez**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.



Guatemala, octubre de 2023

JFGR/gaoc



Guatemala, octubre de 2023

LNG.EEP.OI.700.2023

En mi calidad de Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN
HIDROELÉCTRICA AL CAUDAL DE SALIDA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO
MUNICIPAL DE SAN LUCAS SACATEPÉQUEZ”**

presentado por **Ing. Julio Estuardo Santa Cruz Márquez** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 27 de julio de 2023

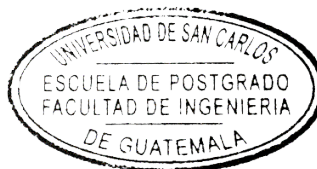
M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA AL CAUDAL DE SALIDA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO MUNICIPAL DE SAN LUCAS SACATEPÉQUEZ** del estudiante **Julio Estuardo Santa Cruz Márquez** quien se identifica con número de carné **null** del programa de Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador
Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados
Escuela de Estudios de Postgrado

Oficina Virtual



Guatemala, 27 de julio de 2023

M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **"IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA AL CAUDAL DE SALIDA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO MUNICIPAL DE SAN LUCAS SACATEPÉQUEZ"** de el/la estudiante **Julio Estuardo Santa Cruz Márquez** del programa de **Maestría En Gestion De Mercados Electricos Regulados** identificado(a) con número de carné null.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Ing. Qco. Gamaliel Zambrano
Col. 686

Mtro. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano
Colegiado No. 686
Asesor de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Estuardo Santa Cruz y Sandra Márquez, por darme su apoyo incondicional y demostrarme el verdadero significado del trabajo duro.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San Carlos
de Guatemala**

Por abrirme las puertas y ayudarme a expandir mis conocimientos.

**Escuela de Estudios de
Postgrado**

Por todo el apoyo y la guía que me brindaron a lo largo de la maestría.

Mi familia

Por ser mi fuente de inspiración.

Mi novia

Por llenarme de felicidad y amor.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS.....	V
GLOSARIO.....	VII
RESUMEN.....	IX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XI
OBJETIVOS	XV
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Tratamiento de aguas residuales.....	5
2.1.1. Planta de tratamiento de aguas residuales	5
2.1.2. Características físicas	8
2.1.3. Características químicas.....	8
2.1.4. Características biológicas	9
2.2. Acuerdo gubernativo 236-2006.....	10
2.3. Situación energética en Guatemala	14
2.4. Marco regulatorio eléctrico en Guatemala	15
2.5. Capacidad de generación de energía eléctrica	15
2.6. Central hidroeléctrica	16
3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
3.1. Características del estudio.....	19

3.1.1.	Diseño del estudio	19
3.1.2.	Enfoque del estudio	20
3.1.3.	Alcance del estudio	20
3.2.	Unidades de análisis	20
3.3.	Variables	21
3.4.	Fases del estudio	22
3.4.1.	Caracterización de agua en PTAR	22
3.4.2.	Sistema de generación	23
3.4.3.	Costo de instalación y operación de sistema de generación.....	29
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	35
4.1.	Caracterización de agua en PTAR	35
4.2.	Sistema de generación.....	39
4.3.	Costo de instalación y operación de sistema de generación ...	41
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	43
CONCLUSIONES		51
RECOMENDACIONES		53
REFERENCIAS.....		55
APÉNDICES		59
ANEXOS		61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Matriz de generación eléctrica anual histórica	11
Figura 2.	Demanda de energía anual de las empresas distribuidoras, del 2000 al 2021	12
Figura 3.	Carta de aplicación de turbinas hidráulicas	25
Figura 4.	Comportamiento de caudal en salida de la PTAR	35
Figura 5.	Comportamiento de temperatura en salida de la PTAR	36
Figura 6.	Comportamiento de pH en salida de la PTAR	36

TABLAS

Tabla 1.	Equipo eléctrico necesario para la conexión	17
Tabla 2.	Matriz de variables e indicadores	21
Tabla 3.	Especificaciones técnicas del generador para la central de generación	27
Tabla 4.	Especificaciones técnicas de la turbina Pelton para la central de generación	27
Tabla 5.	Costo de inversión de instalación de cuarto de máquinas	29
Tabla 6.	Costo de inversión de instalación de tuberías	30
Tabla 7.	Costo de inversión de montaje electromecánico	31
Tabla 8.	Costo de inversión de instalación del canal de restitución	31
Tabla 9.	Costo de inversión de instalación de subestación y línea de transmisión	32
Tabla 10.	Datos de beneficio y costo a 10 años	32

Tabla 11.	Resultados de caudal, temperatura y pH en salida de PTAR ..	37
Tabla 12.	Resultados de análisis fisicoquímico en PTAR.....	38
Tabla 13.	Resultados de análisis de metales pesados en PTAR.....	39
Tabla 14.	Descripción de sistema de generación a instalar en PTAR	39
Tabla 15.	Capacidad de generación de PTAR	40
Tabla 16.	Costo de inversión de sistema de generación	41
Tabla 17.	Costo operativo de sistema de generación.....	42
Tabla 18.	Análisis de costo beneficio	42

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
kV	Kilovatio
MWh	Mega watts hora
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetro
%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrógeno
Q	Quetzal
S	Segundo

GLOSARIO

Caudal	Volumen de fluido por unidad de tiempo.
Coliformes fecales	Grupo de organismos coliformes de procedencia intestinal en animales de sangre caliente y seres humanos.
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno. Medida representativa de la cantidad de materia orgánica en aguas residuales, determinado mediante la medición de la cantidad de oxígeno utilizado para la degradación de la materia orgánica durante un período y temperatura determinada.
Demanda energética	Energía necesaria para suplir con las necesidades de los consumidores de energía
DQO	Demanda química de oxígeno. Medida representativa de la cantidad de materia orgánica e inorgánica en aguas residuales, determinado mediante la cuantificación de oxígeno utilizado para degradar dicha materia.
GDR	Generador distribuido renovable.

Generador	Dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrica entre dos polos transformando energía mecánica en eléctrica.
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales
pH	Potencial de hidrógeno. Hace referencia a que tan ácida o alcalina es la sustancia medida, con un rango de medición de 0 a 14, en el que 0 es lo más ácido y 14 lo más básico.
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
Salto bruto	Altura máxima existente entre el punto de toma del agua y el punto de descarga del caudal turbinado.
Salto neto	Diferencia entre el salto útil y las pérdidas de carga que se produzcan durante el transporte.
Salto útil	Desnivel existente entre la superficie libre del agua en la cámara de carga y el nivel de desagüe en la turbina.
Turbina	Motor utilizado para la conversión de energía cinética o potencial proveniente de un fluido a energía eléctrica.
UGAM	Unidad de Gestión Ambiental Municipal

RESUMEN

Guatemala y el mundo entero se encuentran en una fase de transición en la que buscamos continuar con los procesos actuales, pero de una manera más limpia, buscando que beneficiemos al medio ambiente en vez de afectarlo de manera negativa. Es por ello por lo que se presentan numerosas oportunidades de mejora a los sistemas con los que ya se cuenta actualmente y que pueden beneficiar significativamente. Uno de los recursos en los que más que más beneficio proporciona es el recurso hídrico.

Una de las formas de aprovechamiento del recurso hídrico es la generación de energía eléctrica mediante el caudal tratada en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Es por ello por lo que se diseñó una investigación que permitiera evaluar la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento y transformación de la energía cinética y potencial del agua en la planta de tratamiento de aguas residuales Chichorín, ubicada en San Lucas Sacatepéquez, Guatemala. Para ello fue necesario realizar una caracterización general del agua en la planta de tratamiento, determinar la capacidad de generación de la planta de tratamiento estudiada y de un análisis de inversión del costo que conlleva la instalación de un sistema de generación y los beneficios a los que esta conlleva.

Con esta metodología fue posible establecer que la planta de tratamiento no se encuentra en un estado que beneficie la generación de energía eléctrica, ya que cuenta con parámetros altos de contaminación que puede provocar problemas de deterioro o atascamiento en el sistema que se desea instalar. Además, se estableció que la capacidad de generación de la planta de tratamiento es de 1.00 MWh, lo suficiente para abastecer de suministro energético a las instalaciones de la planta de tratamiento y capaz de reducir la factura de energía mensual que cancelan actualmente. Se estableció igualmente que el costo de instalación del sistema de generación es de Q 846,803.08, con un costo de operación anual de Q 139,615.17. Gracias a ello y al dato de retorno monetario anual de Q 130,600.00, se estableció mediante un análisis de beneficio/costo, con valor de 0.55, que el proyecto no es viable actualmente.

Se recomendó que se mejorara la calidad del agua mediante la sustitución de equipos en la planta de tratamiento, para evitar problemas a futuro con el sistema que se desea instalar. Además, será necesario evaluar la oportunidad de vender energía a la colonia aledaña Chichorín, con el fin de obtener un retorno mayor que represente un ingreso significativo para la municipalidad. Asimismo, se recomendó que se evaluara la alternativa de conectar más casas a la planta de tratamiento, con el fin de aumentar el caudal de ingreso y de salida y con ello el potencial eléctrico con el que cuenta la planta de tratamiento, de manera que exista un sobrante que pueda ser comercializado en el mercado eléctrico de Guatemala.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Contexto general

En Guatemala existe una gran cantidad de recursos que pueden ser reutilizados para beneficio de las comunidades o instituciones que decidan adoptar dichos cambios. Sin embargo, es necesario realizar una serie de recopilación de datos que pueden ser afectados por variables.

Es por ello por lo que la oportunidad del aprovechamiento de recursos puede generar beneficios, tomando en cuenta previamente los factores que pueden llegar a afectar el rendimiento y el ciclo de vida de los equipos que se utilizarían en la implementación de la metodología que sea requerida.

Descripción del problema

Las plantas de tratamiento de aguas residuales, específicamente las plantas de tratamiento aerobias son las plantas más eficientes para la remoción de contaminación en el agua residual doméstica y de producción. Sin embargo, para el correcto funcionamiento de la planta de tratamiento, es necesario utilizar equipos con altos consumos energéticos, como lo son las bombas, equipos de medición y compresores.

Por lo anterior, en muchas ocasiones, los operadores de las plantas de tratamiento tienden a descuidar ciertos aspectos del correcto funcionamiento, por el hecho de destinar una gran parte del presupuesto de la planta a la operación cotidiana.

Es de suma utilidad para los encargados de la planta, encontrar soluciones que puedan mejorar el funcionamiento de la planta y a la vez puedan reducir los costos de operación. De manera que la implementación de un sistema de generación hidroeléctrica en la planta de tratamiento puede ser capaz de absorber una parte del costo de operación de la planta, tal y como lo es la iluminación de las instalaciones.

A pesar de ello, si es necesario que las condiciones de la planta de tratamiento sean las adecuadas para que la implementación del sistema y que la generación sea la adecuada. Para ello, tanto la evaluación del caudal, como los componentes del agua tratada son de suma importancia para evitar deterioros del equipo y evaluar la capacidad de generación de la PTAR.

A través del esquema del árbol de problema, fue posible la identificación de los principales causas y consecuencias del problema planteado. Dicho esquema se presenta en la sección de apéndices.

Formulación del problema

- Pregunta central

Cada una de las causas y consecuencias descritas en el esquema, al ser evaluadas, dieron como resultado una interrogante principal:

¿Qué repercusiones tendrá la implementación de un sistema de generación hidroeléctrica al caudal de salida de la planta de tratamiento de aguas residuales municipal del municipio de San Lucas Sacatepéquez?

- Preguntas auxiliares

Para complementar dicha interrogante y dar más profundidad a la investigación, se plantearon las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿El agua se está tratando correctamente en la PTAR y no perjudicará el sistema de generación hidroeléctrica provocando que se generen mantenimientos recurrentes que aumenten el costo de operación?
- ¿Cuál será la inversión necesaria para la implementación de generación hidroeléctrica en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de San Lucas Sacatepéquez?
- ¿Cómo se verá afectado el costo operativo de la planta de tratamiento de aguas residuales utilizando la energía generada con el caudal de salida?

Delimitación del problema

Se presentará una delimitación contextual, geográfica e histórica del problema sobre el cuál se realizará la investigación.

- Delimitación contextual

La evaluación del impacto de la implementación de un sistema de generación hidroeléctrica en la planta de tratamiento de aguas municipales de San Lucas Sacatepéquez se contextualizó en el ámbito del aprovechamiento de recursos para la generación eléctrica, el cual no ha sido estudiado a profundidad, por lo que no se saca el completo provecho de los recursos reutilizables de los que se pueden disponer. Dicha evaluación involucra una serie de variables directas e indirectas que pueden afectar los resultados obtenidos y la manera en la que son medidos, de los cuáles caben resaltar cuatro: generación de sistema hidro implementado, costo operativo actual de la planta de tratamiento, costo de implementación de sistema de generación hidro y la serie de parámetros que conlleva la realización de un análisis fisicoquímico en el agua tratada.

- Delimitación geográfica

Para realizar el estudio se utilizaron los datos obtenidos de la planta de tratamiento de aguas residuales municipal de San Lucas Sacatepéquez, por lo que la delimitación geográfica se realizó con base en el agua tratada únicamente en dicho municipio.

- Delimitación histórica

Se delimitó la información obtenida a un período máximo de un año para la obtención de los datos del agua, de manera que los resultados reflejen el impacto de la implementación en las condiciones actuales de operación y de capacidad de generación de la planta de tratamiento.

OBJETIVOS

General

Establecer las repercusiones que tendrá la instalación de un sistema de generación hidroeléctrica al caudal de salida de la planta de tratamiento de aguas residuales municipal de San Lucas Sacatepéquez.

Específicos

1. Evaluar el tratamiento del agua residual en la planta de tratamiento municipal de San Lucas Sacatepéquez y sus posibles repercusiones en un sistema de generación hidroeléctrico implementado en su salida.
2. Determinar la inversión necesaria para la implementación de un sistema de generación hidroeléctrica al caudal de salida de la planta de tratamiento de aguas residuales municipal de San Lucas Sacatepéquez.
3. Examinar el comportamiento del costo operativo de la planta de tratamiento de aguas residuales municipal de San Lucas Sacatepéquez al utilizar la energía generada por un sistema de generación hidroeléctrica y el caudal de salida.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La investigación será realizada bajo un diseño no experimental, ya que se obtendrá la recolección de datos de una muestra tomada en la PTAR designada obteniendo la caracterización del agua. Asimismo, se considera un estudio de carácter transversal, ya que se tomarán las muestras únicamente del agua para caracterizarla para su posterior evaluación.

El enfoque del estudio es completamente cuantitativo, debido a la naturaleza de los datos obtenidos para la caracterización y la medición de las repercusiones. En el caso del alcance, el estudio es definido como descriptivo y de pronóstico, debido a que se busca explicar las características y propiedades de la PTAR, basándonos en los datos obtenidos. La población a la que se realizará el estudio correspondiente será la planta de tratamiento de aguas residuales municipales Chichorín del municipio de San Lucas Sacatepéquez.

En cuanto a las variables, se utilizan cuatro que definen la estructura del estudio, siendo la primera la calidad del agua, haciendo referencia a las características físicas, químicas y biológicas del agua de la PTAR. Seguido de esta se encuentra el costo de instalación del sistema de generación, que refleja la compra, transporte e instalación de los equipos necesarios para dicha generación. Posteriormente se encuentra el costo operativo de la PTAR, el cuál es de utilidad para tener una referencia inicial y evaluar los beneficios o impedimentos de la instalación del sistema. Por último, se encuentra la capacidad de generación de la PTAR, la cual consiste en la cuantificación de la generación teórica del sistema en el que se transforma la energía del agua a energía eléctrica.

Inicialmente se pretende realizar una caracterización del agua de salida de la planta de tratamiento de aguas residuales para evaluar su estado actual y las repercusiones que tendrá en el sistema de generación hidroeléctrica que se desea instalar. Posteriormente se establece la necesidad de determinar el potencial eléctrico de la planta bajo las condiciones actuales. Por último, se realizará una evaluación de la inversión inicial y anual del sistema de generación para que sea comparado con el beneficio obtenido mediante dicha instalación.

INTRODUCCIÓN

Actualmente se tienen oportunidades de innovación que permiten anhelar una mejora continua que garantiza que los procesos se encuentran actualizados y que se está sacando el mejor provecho de ellos. Es por ello por lo que la medición del impacto de la implementación de un sistema de generación hidroeléctrica al caudal de salida de la planta de tratamiento municipal de San Lucas Sacatepéquez abre las puertas a una de tantas mejoras que se pueden adaptar a la infraestructura para obtener beneficios adicionales a los que ya se encuentran establecidos.

Tomando en cuenta dicha primicia, es posible cuantificar y demostrar qué tan factible es la instalación de un equipo de generación en una planta de tratamiento que servirá como base para todas aquellas plantas de tratamiento que deseen realizar adaptaciones similares, siempre con el fin de generar energía, reducir costos de operación y promover la generación a través de recursos renovables.

Es por ello por lo que en la investigación se realizaron subdivisiones que nos permiten observar, de una forma más clara y precisa, el funcionamiento del sistema propuesto, el proceso de análisis y las repercusiones que se tendrán en caso de que se instale o no el sistema de generación. Esto con el fin de comparar los resultados y determinar el grado de factibilidad que tiene la inversión en este tipo de tecnologías adaptadas a sistemas locales.

En el primer capítulo se abordan los trabajos relacionados a la investigación, lo cual fue de apoyo para estructurar la idea de la investigación, así como obtener perspectivas desde las cuales se pueden abordar la investigación para obtener resultados novedosos y que permitan buscar mejorar las instalaciones o condiciones actuales.

El segundo capítulo abarca toda la base teórica que sirve como cimiento para el desarrollo de la investigación. Se detallan los conceptos y definiciones de los temas generales que componen la investigación, tomando en cuenta cada uno de los factores que pueden afectar o se ven involucrados en el proceso completo.

El tercer y cuarto capítulo se comprenden de los análisis y estudios realizados para llevar a cabo la investigación. Se representa el proceso completo de recopilación de datos, el análisis correspondiente y la presentación de los resultados obtenidos para proceder a discutir y concluir sobre ellos.

En el quinto y último capítulo se presenta la discusión de los resultados obtenidos, basados en los objetivos planteados inicialmente. Asimismo, se profundiza en la repercusiones positivas y negativas que puede llegar a generar la instalación de la tecnología planteada, así como las consideraciones que se deben de tomar en cuenta previo a iniciar un estudio que involucre el diseño e instalación de los equipos correspondientes.

Optar por este tipo de modificaciones es de gran beneficio, no solo para los inversores, sino también puede llegar a beneficiar comunidades aledañas, por lo que es sumamente factible el aprovechamiento de los recursos que actualmente ya se tienen disponibles, para obtener aún más beneficios.

1. ANTECEDENTES

Se han realizado estudios previamente relacionando el agua que sale de las plantas de tratamiento de aguas residuales y su capacidad de generación de energía hidroeléctrica para determinar si es factible la instalación del equipo o si no es económicamente conveniente, tal y como lo hizo (de León, 2018). En dicha investigación, se concluyó que la generación potencial de una planta de tratamiento instalada en el municipio de Mixco cumple con ciertos parámetros establecidos en la Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable (NTGDR) para ser considerada como un GDR. Tal y como se planea realizar en esta investigación, se evaluó económicamente la conveniencia de la instalación de los equipos de generación para determinar si es rentable o no, utilizando como resultado el índice de rentabilidad de la adaptación.

Adicionalmente, se han realizado investigaciones en las que se ha analizado la calidad del agua de salida y su adecuado tratamiento. Estas investigaciones son de sumo interés debido a que la calidad del agua puede afectar de manera significativa el funcionamiento y el ciclo de vida de los equipos que se requieran instalar para generar energía eléctrica. Barquín, (2015) estableció que, para que una planta de tratamiento cuente con potencial para generar energía, debe cumplir con los parámetros establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006, y que uno de los parámetros críticos que pueden limitar el potencial es la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

Para ello será necesario realizar una serie de análisis al agua de entrada y salida de la planta de tratamiento que se desea analizar, tal y como lo hizo Rabanales, (2015) el cual en dicha investigación realizó una evaluación de la operación de la misma planta de tratamiento que se desea evaluar en esta investigación y se determinó que existen mejoras que se pueden realizar al sistema para hacer más eficiente su funcionamiento y reducir los parámetros de contaminación que pueden llegar a afectar el sistema de generación que se planteará. En el transcurso de siete años, es posible que ya se hayan adaptado algunas de estas mejoras, por lo que se podría evaluar su funcionamiento y el cambio que ha sufrido la planta en el período transcurrido.

También se han realizado análisis de generación de energía eléctrica por métodos que no son hidroeléctricos. De acuerdo con Marroquín, (2018), es posible implementar un sistema de generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento del gas metano producido en biorreactores UASB para el tratamiento del agua residual. Es por ello por lo que este tipo de estudios puede funcionar como un punto de comparación de generación de energía eléctrica y determinar si es más factible la implementación de un sistema hidroeléctrico u otro.

Guzmán, (2018) realizó un diagnóstico e inventario de las plantas de tratamiento de aguas residuales que se encontraban operando en dicho año, específicamente para el municipio de San Lucas Sacatepéquez. Dicho inventario fue realizado para plantas de tratamiento públicas y privadas; y se pretendía evidenciar si contaban con los análisis correspondientes para determinar si cumplían con lo establecido en el Acuerdo Gubernativo 236-2006; desafortunadamente no fue posible evaluar si se cumplía o no con estos parámetros en la mayoría de las plantas.

Esta investigación puede ser utilizada como base para determinar si las plantas de tratamiento pueden implementar el sistema de generación y si es financiera y operativamente factible para los encargados de las plantas.

Dada la falta de información correspondiente a la operación y las condiciones de la planta de tratamiento que se desea evaluar y la falta de investigación correspondiente a la generación de energía a partir de agua tratada, es posible complementar los huecos con la información recopilada y los resultados obtenidos en esta investigación. La ampliación en investigación dirigida a este ámbito puede ser utilizada como guía para implementación o evaluación en futuros proyectos de construcción o dimensionamiento de plantas de tratamiento de aguas residuales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de agua residual consta de la eliminación de contaminación en el agua a través de una serie de procesos físicos, biológicos y químicos, con el fin de disponer finalmente del agua sin causar ningún daño a infraestructura o al medio ambiente. Los contaminantes del agua pueden provenir de residuos de aguas domésticas o aguas utilizadas en procesos industriales o de producción.

2.1.1. Planta de tratamiento de aguas residuales

Una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) es una construcción en la que se lleva a cabo el tratamiento del agua residual a la que se le desea reducir la contaminación. Las plantas de tratamiento pueden variar sus diseños dependiendo del tipo de agua residual que reciba para obtener mejores resultados en el proceso. Por lo general, una planta de tratamiento se divide en tres secciones:

- Tratamiento primario

El tratamiento primario tiene como principal objetivo eliminar todo aquel desecho de gran tamaño o sólidos suspendidos que pueden ser retirados mediante algún método de separación, como la precipitación o sedimentación.

En esta etapa son retirados residuos sólidos de procesos de producción, si el agua que se desea tratar proviene de un proceso productivo, o desechos inorgánicos flotantes como polímeros e incluso arena, si el agua proviene de uso doméstico (Bretas *et al.*, 2020).

En dicha etapa se asegura de que el agua continúe con el proceso de tratamiento sin que exista presencia de un material que pueda afectar de manera negativa la reducción de contaminación. Por lo general se utilizan rejilla que sean capaces de retener los sólidos de gran tamaño y se construyen serpentines con bases en forma cónica que permitan la sedimentación de arena o materia flotante de menor tamaño (Bretas Alvim *et al.*, 2020).

Una adecuada operación del tratamiento primario promueve el retiro continuo del desecho sólido removido para evitar el arrastre hacia etapas posteriores.

- Tratamiento secundario

Esta es la etapa crítica del tratamiento, ya que en esta se elimina la mayoría de la contaminación presente en el agua mediante un tratamiento biológico. En esta etapa, las bacterias presentes en el medio se encargan de degradar el desecho orgánico presente en el agua y formar lodos activados a partir de este. Por lo general se lleva a cabo en fases anaerobias (sin presencia de oxígeno) y aerobias (presencia de oxígeno); la combinación de ambas fases en un tratamiento secundario puede incrementar significativamente la eficiencia de remoción de contaminación de una planta de tratamiento (Espitia-Cabrera, 2018).

El oxígeno se suministra a partir de compresores que distribuyen de manera regular y pareja el oxígeno en el agua mediante difusores. La inyección de oxígeno se puede controlar mediante la medición de concentración de oxígeno disuelto en el agua presente en la fase de tratamiento y puede ser un indicador de la contaminación presente en el agua.

Los lodos producidos en esta etapa del tratamiento son retornados a la entrada de los tanques, con el fin de promover la generación de lodos sanos y jóvenes que permitan un adecuado funcionamiento de la planta de tratamiento. Sin embargo, los lodos deben ser purgados con cierta regularidad para evitar la sobresaturación de estos y que sean arrastrados a etapas posteriores del tratamiento.

La consistencia y coloración de los lodos pueden ser utilizadas como un acercamiento inicial al estado actual de la planta de tratamiento para determinar si ésta se encuentra operando adecuadamente o puede mejorar.

- Tratamiento terciario

El tratamiento terciario es el encargado de eliminar todo aquel componente que no es eliminado en etapas posteriores y es denominado “etapa de desinfección”. En dicha etapa, por lo general, se trata químicamente el agua para su disposición final en el cuerpo de agua receptor, alcantarillado o para riego. Además, puede ser utilizada para promover la sedimentación de los lodos que producidos en el tratamiento secundario y evitar que estos sean arrastrados.

Al igual que en el tratamiento primario, se suele construir un serpentín que aumente el tiempo de retención del agua y esta pueda reaccionar químicamente con el producto que se aplique (hipoclorito de sodio) y se pueda llegar a un equilibrio.

2.1.2. Características físicas

A continuación, se presentan las características físicas.

- **Temperatura**

La temperatura se refiere a la magnitud de la noción de calor que puede medirse físicamente. Además, puede definirse como una magnitud relacionada a la energía interna de un sistema. A medida que aumente la energía cinética de un sistema, la temperatura también aumenta y por ende estará más caliente; sucede lo mismo cuando la energía cinética de un sistema disminuye, alterando proporcionalmente la temperatura y volviéndolo más frío (Cengel & Boles, 2009).

- **Sólidos suspendidos**

Los sólidos suspendidos son todas aquellas partículas en estado sólido que permanecen en suspensión en agua. Los sólidos en suspensión se pueden eliminar por sedimentación debido a su tamaño y peso y se utiliza como indicador de la calidad del agua (Green & Southard, 2019).

2.1.3. Características químicas

A continuación, se presentan las características químicas.

- Potencial de hidrógeno

El potencial de hidrógeno (pH) es una medida de la concentración del ión hidrógeno y matemáticamente se define como el logaritmo decimal cambiado de signo de la concentración de ión hidrógeno. La escala de medición de pH se define de 0 a 14; en caso de que el valor de pH sea 7, se define la solución como neutra, mientras que si es menor a 7 es ácida y mayor a 7 alcalina (Green & Southard, 2019).

- DBO/DQO

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) no es realmente una sustancia química, sino se refiere a la cantidad de oxígeno que una mezcla compleja de sustancias absorberá bajo condiciones físicas, químicas y biológicas en un tiempo determinado. Por su lado la Demanda Química de Oxígeno (DQO), hace referencia a una medida indicativa de la cantidad de oxígeno que puede ser consumida por reacciones en una solución. Ambas concentraciones se expresan comúnmente como la masa de oxígeno sobre el volumen de solución (mg/L), en sistema internacional. La relación entre el DQO y el DBO se usa a menudo para indicar qué tan tratable es un efluente por medios biológicos. Las proporciones de DQO:DBO muy por encima de “3” generalmente se toman como una indicación de que el tratamiento biológico probablemente no sea una opción viable (Moran, 2018).

2.1.4. Características biológicas

Los coliformes son las principales representantes de las características biológicas que afectan el agua; son indicadores microbianos de la calidad de agua y representan en parte la presencia de materia fecal. Estas bacterias que

representan la materia fecal son conocidas como coliformes fecales. Al intentar realizar un análisis de aguas residuales de procedencia doméstica las coliformes fecales son uno de los principales indicadores debido a que estas bacterias generalmente no se multiplican fuera del intestino y la mayor especie en el grupo de coliforme fecal es la “*Escherichia coli*” (Botello, 2005).

2.2. Acuerdo gubernativo 236-2006

El objetivo del acuerdo es establecer los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reúso de aguas residuales, así como para la disposición de lodos. Lo anterior para que, a través del mejoramiento de las características de dichas aguas, se logre establecer un proceso continuo que permita:

- Proteger los cuerpos receptores de agua de los impactos provenientes de la actividad humana.
- Recuperar los cuerpos receptores de agua en proceso de eutrofización.
- Promover el desarrollo del recurso hídrico con visión de gestión integrada (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y Renovables, 2006).

2.3. Situación energética en Guatemala

El contexto energético en Guatemala se ha visto en constante crecimiento a lo largo del tiempo, de tal manera que ha sido foco de numerables inversiones que han beneficiado no solo económicamente al país, sino ambientalmente. Gracias a ello la investigación ligada al sector eléctrico se ha visto fomentada e incentivada para que los proyectos de generación obtengan crecimientos significativos.

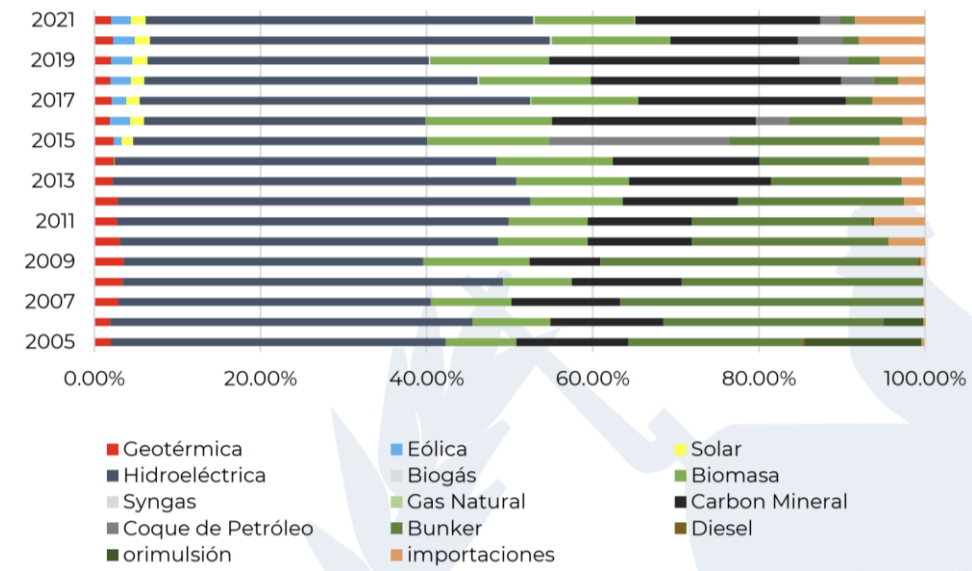
- Matriz energética en Guatemala

La matriz energética es básicamente una representación de la composición de las fuentes de energía utilizadas para satisfacer sus necesidades energéticas de un país. En el caso de Guatemala, la matriz se compone principalmente de fuentes hidroeléctricas, térmicas, eólicas, solar e incluso combustibles fósiles.

Específicamente, la energía hidroeléctrica en Guatemala ha sido parte importante de la matriz energética de Guatemala debido a su abundancia de recursos hídricos. A continuación, se presenta la matriz de generación eléctrica anual histórica:

Figura 1.

Matriz de generación eléctrica anual histórica



Nota. Matriz de generación eléctrica anual histórica. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas, (2022). *Plan de expansión indicativo del sistema de generación 2022-2052.* (p.174). MEM.

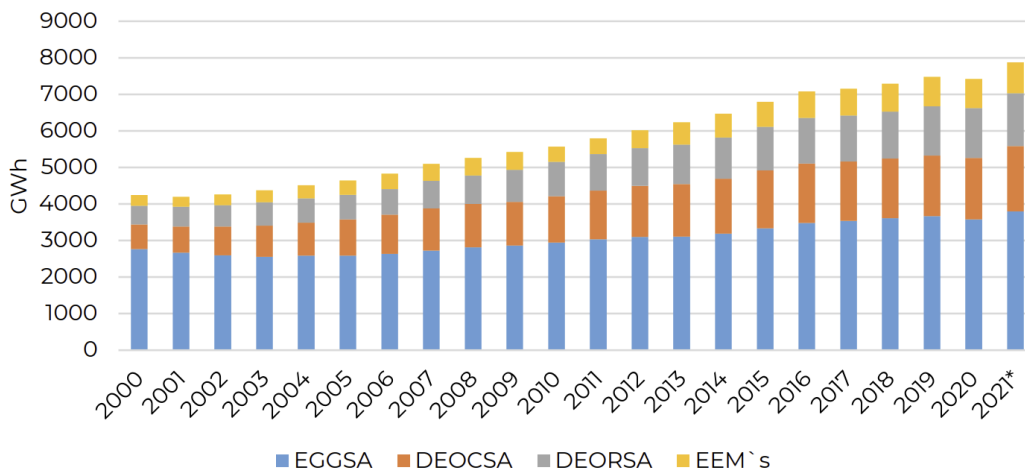
- Demanda de energía y crecimiento proyectado

La demanda energética de Guatemala se ha visto correlacionada con el estado socioeconómico del país, por lo que ha mostrado un incremento constante a lo largo de los años. Cabe resaltar que en los datos históricos recopilados del año 2000 al 2021, el año en el que se vio el mayor incremento de demanda fue el 2015, mientras que el año en el que se obtuvo el menor crecimiento fue el 2008 (Ministerio de Energía y Minas, 2022).

A continuación, se representa gráficamente el comportamiento de la demanda en el período del 2000 al 2021:

Figura 2.

Demanda de energía anual de las empresas distribuidoras, del 2000 al 2021



Nota. Demanda de energía histórica anual de las empresas distribuidoras, período 2000-2021. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas, (2022). *Plan de expansión indicativo del sistema de generación 2022-2052.* (p. 174). MEM.

2.4. Marco regulatorio eléctrico en Guatemala

Los planes y políticas guatemaltecos ligados al sector energético en Guatemala se basan en las bajas emisiones de gases de efecto invernadero, con el fin de mitigar el cambio climático, por lo que la generación, transporte y distribución de la energía del sistema nacional interconectado deben ser calculados mediante la contabilización de los combustibles y pérdidas que se generaron en las redes de transmisión y distribución.

Guatemala se basa en la política energética 2008-2015, el cual tiene como objetivo contribuir al desarrollo energético sustentable en el país, asegurando el abastecimiento oportuno, continuo y de calidad, a precios competitivos (Ministerio de Energía y Minas, 2022).

- **Marco institucional del subsector eléctrico**

Los agentes participantes del subsector eléctrico nacional se componen de tres principalmente, que son a la vez los encargados de regular el mercado completo, el Ministerio de Energía y Minas, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica y el Administrador del Mercado Mayorista. Además de ellos, el mercado se compone de los generadores, los transportistas, comercializadores, distribuidores y los grandes usuarios.

- **Normativas y leyes relacionadas a la generación hidroeléctrica**

En Guatemala, la generación hidroeléctrica está regulada por un conjunto de normativas y leyes que buscan promover el desarrollo sostenible de esta fuente de energía renovable, al tiempo que garantizan la protección del medio ambiente y los derechos de las comunidades locales. Algunas de las normativas

y leyes clave relacionadas con la generación hidroeléctrica en Guatemala y de acuerdo con el Ministerio de Energía y Minas (2003) son las siguientes:

Ley General de Electricidad: esta ley establece el marco legal general para el sector eléctrico en Guatemala, regulando la generación, distribución, transmisión y comercialización de electricidad. En dicha ley se establecen las obligaciones e implicaciones del sector eléctrico para cada uno de los participantes previamente mencionados.

- Ley de incentivos para la generación de energía con recursos renovables: esta ley fomenta la inversión en proyectos de energía renovable, otorgando incentivos fiscales y arancelarios a los inversionistas. Busca diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de fuentes no renovables.
- Ley de áreas protegidas: especialmente en el contexto hídrico, la ley pretende regular el uso y aprovechamiento de los recursos hídricos en Guatemala. Es por ello que establece requisitos específicos relacionados con la concesión de derechos de agua y la protección de cuencas hidrográficas.
- Convenio 169 de la OIT: dicho convenio establece la obligación de consultar a las comunidades indígenas antes de llevar a cabo proyectos que afecten sus territorios (Oficina Internacional del Trabajo, 2014).

2.5. Capacidad de generación de energía eléctrica

Es importante establecer ciertos parámetros necesarios, como la altura inicial y la altura final, para definir el salto neto del agua. Con dichos datos y el

caudal determinado previamente, es posible utilizar los valores de eficiencia brindados por los fabricantes en los equipos de generación para determinar cuantitativamente la capacidad de generación que presenta la salida de agua de una planta de tratamiento.

2.6. Central hidroeléctrica

Una central hidroeléctrica es una edificación en la que se utiliza agua para la producción de energía hidráulica y con ello generar energía eléctrica. Las centrales aprovechan la energía potencial gravitatoria del agua de un cauce para hacerla pasar por una turbina hidráulica que transmite energía a un generador eléctrico donde se transformará en energía eléctrica (Colombo & Lito Velox, 1987).

Según el informe de 2019 de la Agencia Internacional de las Energías Renovables (2021), la capacidad total de las centrales hidroeléctricas en todo el mundo es de 1.172 GW, lo que representa alrededor del 50 % del total de las fuentes de energía renovable.

- **Potencial eléctrico**

El potencial eléctrico se refiere a la tasa, por unidad de tiempo, a la cual la energía eléctrica es transferida por un circuito eléctrico, y se expresa en el sistema internacional mediante el vatio. Dicha energía es producida por generadores eléctricos o por fuentes, como baterías eléctricas (Duharte *et al.*, 2021).

El potencial eléctrico es una magnitud que nos permite obtener una medida del campo eléctrico en un punto determinado a través de la energía

potencial electrostática que adquiriría una carga si la colocamos en el mismo punto. Los puntos en los que el valor del potencial eléctrico es el mismo, reciben el nombre de superficie equipotencial.

Cada punto de una superficie equipotencial se caracteriza por lo siguiente:

- El campo eléctrico es perpendicular a la superficie en dicho punto y se dirige hacia valores decrecientes de potencial eléctrico.
 - Cada punto solo puede pertenecer a una superficie equipotencial, ya que el potencial eléctrico es un único valor en cada punto.
- Generador distribuido renovable

De acuerdo con la Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoprodutores con Excedentes de Energía (NTGDR), un Generador Distribuido Renovable (GDR) se define como toda aquella persona individual, jurídica o titular de una central de generación de energía.

Dicha central de generación debe utilizar recursos renovables, como la biomasa, energía hidráulica, solar, etcétera. Asimismo, debe conectarse a las instalaciones de distribución con un aporte inferior o igual al que establece el Reglamento de la Ley General de Electricidad 5MW (CNEE, 2014).

Para poder actuar como un GDR, es necesario cumplir con ciertos requisitos establecidos por el RLGE; dichos requisitos varían según el tipo de GDR que está interesado en conectarse a un punto de conexión según la NTGDR. Para poder optar a la conexión, es necesario cotar con el equipo eléctrico necesario detallado a continuación.

Tabla 1.*Equipo eléctrico necesario para la conexión*

Tipo de conexión	Capacidad			
	Monofásico (5)	Trifásico		
Características	≤ a 50 kW	≤ a 500 kW	> 500 kW - 2000 kW	> 2000 kW - 5000 kW
Dispositivos de interrupción (Capacidad máxima de interrumpir la máxima corriente de falla)	X	X	X	X (4)
Dispositivos de desconexión de la interconexión	X	X	X	X
Dispositivos de desconexión del generador	X	X	X	X
Disparo por sobretensión	X	X	X	X
Disparo por baja tensión	X	X	X	X
Disparo por sobre/baja frecuencia	X	X	X	X
Chequeo de sincronismo (A: automático, M: Manual)	X-A/M (1)	X-A/M (1)	X-A (1)	X-A (1)
Disparo por sobre corriente a tierra	-	X- (2)	X- (2)	X- (2)
Disparo de potencia inversa	-	X- (3)	X- (3)	X- (3)
Características	≤ a 50 kW	≤ a 500 kW	> 500 kW - 2000 kW	> 2000 kW - 5000 kW
Disparo por telemetría/transferido	-	-	-	X
Regulador automático de tensión	-	-	-	X- (1)
Disparo por falta de tensión en la red (Relé)	X	X	X	X

Nota. Equipo necesario para la conexión de sistemas de generación: Obtenido de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2014). Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoproductores con Excedentes de Energía. (<https://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/Normas%20Tecnicas/08%20NTGDR.pdf>)

consultado el 10 de agosto de 2022. De dominio público

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Características del estudio

Las características de la metodología del estudio se conforman por el enfoque, alcance, diseño y unidad de análisis; dichas secciones se encuentran a continuación.

3.1.1. Diseño del estudio

La investigación será realizada bajo un diseño no experimental, ya que se obtendrá la recolección de datos de una muestra tomada de la planta de tratamiento de aguas residuales municipal de San Lucas Sacatepéquez que define el comportamiento actual del agua antes y después del tratamiento correspondiente.

Específicamente se trata de un diseño no experimental transversal, ya que se tomarán las muestras únicamente del agua para caracterizarla y posteriormente evaluar la repercusión económica y operacional de la instalación de un sistema de generación hidroeléctrica en la salida de la planta de tratamiento.

3.1.2. Enfoque del estudio

El enfoque del estudio es completamente cuantitativo, ya que es necesario realizar una serie de recopilación de datos que serán utilizados para la caracterización del agua en la planta de tratamiento de aguas residuales municipales de San Lucas Sacatepéquez, además de recopilar la información correspondiente y las cotizaciones de los equipos que se requieren para la propuesta de instalación de un sistema de generación hidroeléctrico en la salida de la planta previamente mencionada. Asimismo, se evaluará la repercusión económica de dicha instalación para la evaluación de instalación del proyecto.

3.1.3. Alcance del estudio

El alcance del estudio es definido como descriptivo y de pronóstico, debido a que se busca explicar las características, comportamientos y las propiedades de la planta de tratamiento de aguas residuales en la que se realizará la medición del comportamiento al realizar la instalación de un sistema de generación hidroeléctrica.

Además, se busca evaluar el costo de instalación del sistema de generación y para ellos es necesario determinar el comportamiento del agua en la planta, principalmente en la salida y evaluar la mejor opción en cuanto a costos de instalación y durabilidad de los equipos.

3.2. Unidades de análisis

La población a la que se realizará el estudio correspondiente será la planta de tratamiento de aguas residuales municipales del municipio de San Lucas Sacatepéquez, caracterizando el agua antes y después del tratamiento llevado a

cabo en la instalación, así como la repercusión que tendría en términos económicos y operativos, la instalación de un sistema de generación hidroeléctrico en la salida de dicha planta.

3.3. Variables

A continuación, se presentan las variables que contemplan la investigación.

Tabla 2.

Matriz de variables e indicadores

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores
Calidad del agua	Hace referencia a las características físicas, químicas y biológicas del agua	Concentración	Concentración de contaminación química en la entrada y salida de la PTAR
			Concentración de contaminación física en la entrada y salida de la PTAR
			Concentración de contaminación biológica en la entrada y salida de la PTAR
Costo de instalación	Costo que refleja la compra, transporte, instalación y operación de los equipos de generación de energía hidroeléctrica	Costos	Costo de equipos
			Costo de instalación de equipos
			Costo de operación de los equipos
Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores
Costo operativo de PTAR	Es el costo que representa el adecuado funcionamiento y	Costo operativo	Costo actual del funcionamiento de la PTAR

Continuación tabla 2.

mantenimiento de la PTAR			
Capacidad de generación de sistema hidroeléctrico	Consiste en la medición de generación teórica de un sistema que transforma energía de algún tipo a energía eléctrica	Generación de energía	Capacidad de generación de energía

Nota. Detalle de las variables e indicadores del trabajo de investigación. Elaboración propia, utilizando Microsoft Word.

3.4. Fases del estudio

A continuación, se presentan la descripción de las fases propuestas para la solución del presente trabajo:

3.4.1. Caracterización de agua en PTAR

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el análisis fisicoquímico, de metales pesados, caudal, pH y temperatura realizados en la planta de tratamiento de aguas residuales municipal Chichorín de San Lucas Sacatepéquez, ubicada en la 2a. avenida 0-71 "A" del casco urbano, zona 2, San Lucas Sacatepéquez.

Para ello fue necesario realizar un muestreo compuesto con duración de 24 horas, con el fin de evidenciar el comportamiento de la planta de tratamiento en un día completo. El monitoreo completo se realizó a través de la empresa ECOQUIMSA del lunes 24 de abril del 2023 a las 10:15 A.M., al martes 25 de abril del 2023 a las 10:15 A.M. ECOQUIMSA fue empresa encargada de la instalación de los equipos de medición, infraestructura y de llevar a cabo la

batería de análisis necesarios para la caracterización del agua en la planta de tratamiento.

La medición de caudal y temperatura se realizó con un equipo automático de medición de flujo, marca ISCO modelo 2150, utilizando un vertedero en V de 45°. Las mediciones de altura y temperatura se realizaron en intervalos de 5min, de acuerdo con el procedimiento de medición de caudal PRO25-MUE.

Los resultados obtenidos tanto en el análisis fisicoquímico, como en el análisis de metales pesados fueron comparados con los límites máximos permisibles establecidos por la etapa cuatro, Artículo 24 del Acuerdo Gubernativo 236-2006 *Límites máximos permisibles de descargas a cuerpos receptores para aguas residuales municipales y de urbanizaciones no conectadas al alcantarillado público*.

La caracterización del agua de salida en la planta de tratamiento es de suma importancia, no solo para el medio ambiente, sino también se ve relacionada con la durabilidad de los equipos con los que entra en contacto al momento de ingresar al sistema de generación. Físicamente es capaz de generar atascamientos en la turbina Pelton debido a los sólidos suspendidos que puede arrastrar el agua desde el sistema de tratamiento. Además, el agua que se encuentra contaminada biológicamente es capaz de crear biopelículas en las paredes de las tuberías y equipos, lo que puede llegar a causar un deterioro severo en dichos componentes, disminuyendo significativamente su tiempo de vida y su funcionamiento.

3.4.2. Sistema de generación

A continuación, se presentan el sistema de generación.

- Potencial eléctrico

Para la determinación del sistema de generación es necesario, como primer punto, determinar el cálculo del potencial eléctrico determinando la serie de parámetros que permite realizar el cálculo correspondiente. Es por ello por lo que se determinó la altura inicial y final del agua con el fin de establecer el salto neto y, en conjunto con la serie de datos de caudal y eficiencias, se utilizó la siguiente ecuación para determinar el potencial eléctrico.

$$P = 9,810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} * Q * H_N * \eta_{\text{Generador}} * \eta_{\text{Turbina}} * \eta_{\text{Mecánica}} \quad (1)$$

Donde:

Q = Caudal en metros cúbicos por segundo

H_n = Salto neto

η = Eficiencia

Las eficiencias de la turbina y del generador fueron brindadas por el productor y están definidas en 70 % ambas. En el caso de la eficiencia mecánica, se estableció una eficiencia del 100 % al ser de ejes acoplados. Al realizar las sustituciones de datos necesarias se obtiene la siguiente ecuación.

$$P = 9,810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} * 0.00331 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 13 \text{ m} * 0.70 * 0.70 * 1 = 206.84 \text{ kW}$$

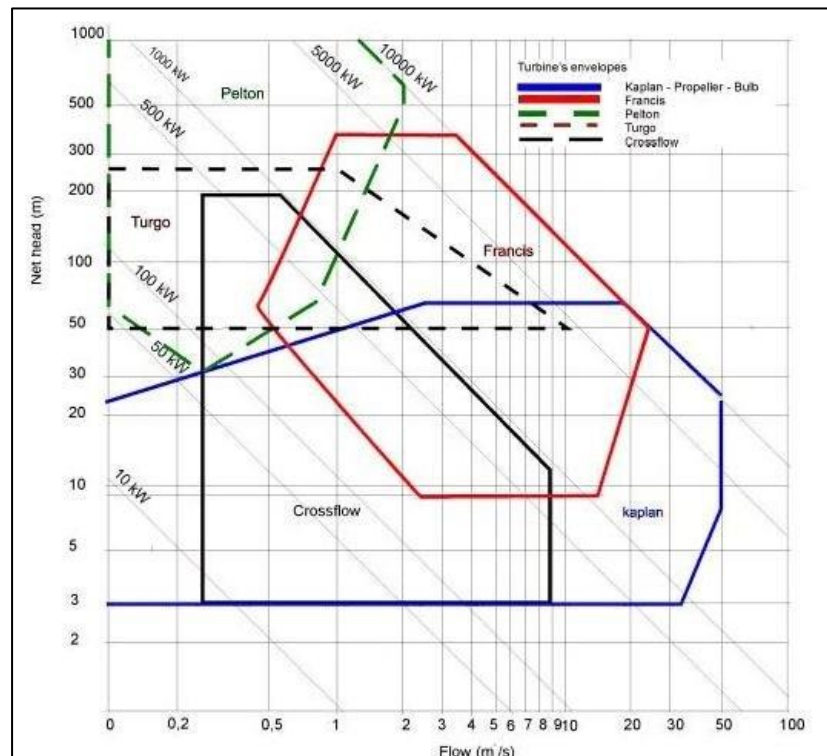
- Central hidroeléctrica

Para la construcción de una central hidroeléctrica es necesario contar principalmente con una turbina y un generador que permita aprovechar la energía hidráulica. Iniciando con el tipo de turbina por utilizar, se utilizó como referencia

la siguiente carta de aplicación de turbinas hidráulicas, la cual toma en consideración el caudal y salto hidráulico correspondiente.

Figura 3.

Carta de aplicación de turbinas hidráulicas



Nota. Carta de aplicación de turbinas hidráulicas. Obtenido de Fraenkel *et al.* (1991). *Micro-hydro power: A guide for development workers*. (p. 145). Intermediate Technology Publications.

En seguimiento a lo establecido por la carta de aplicación de las turbinas, se estableció que la mejor opción de instalación para la planta de tratamiento, de acuerdo con el salto hidráulico y el caudal determinados mediante la caracterización, era la turbina Pelton. Posteriormente fue necesario establecer el generador a utilizar, tomando en cuenta la velocidad específica cinemática y dinámica del fluido. Para ello se utilizó las siguientes ecuaciones.

$$N_q = \frac{N_T \sqrt[4]{Q}}{\sqrt{H_N^3}} \quad (2)$$

$$N_s = 3.03 N_q \quad (3)$$

Donde:

N_q = Velocidad específica dinámica

N_s = Velocidad específica cinemática

N_t = Velocidad de giro de la turbina

En el caso de esta última variable, se utiliza la velocidad del rotor en revoluciones por minuto, la cual es determinada utilizando la siguiente ecuación.

$$n_m = \frac{120 f_e}{P} \quad (4)$$

Donde:

n_m = Velocidad del rotor en revoluciones por minuto

F_e = Frecuencia eléctrica en Hertz

P = Número de polos

Al resolver dicha ecuación se obtiene lo siguiente.

$$n_m = \frac{120 \cdot 60}{8} = 900 \text{ rpm}$$

Gracias a que los ejes de la turbina y el generador están acoplados, tanto la velocidad de la turbina como la sincrónica deben ser las mismas, por lo que es posible determinar que $n_m = N_T$ y es posible resolver las ecuaciones previamente planteadas para la velocidad específica dinámica y la velocidad específica cinemática.

$$N_q = \frac{900 \text{ rpm} \cdot \sqrt[2]{0.00331 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}}{\sqrt[4]{13^3}} = 7.56 \text{ rpm}$$

$$N_s = 3.03 \cdot 7.56 = 22.92 \text{ rpm}$$

Gracias a la definición de las velocidades específicas es posible determinar que la mejor opción es la turbina Pelton de una tobera y con ello establecer las especificaciones mínimas del equipo eléctrico y mecánico con las que deberá contar la central hidroeléctrica. Dichas especificaciones se definen a continuación.

Tabla 3.

Especificaciones técnicas del generador para la central de generación

Descripción	Parámetro	Valor
Generador con cuatro pares de polos	Descripción	De imanes permanentes de 3 fases
	Potencia subministrada	50 – 1600 W
	Eficiencia	70%
	W/rpm	1 W/rpm

Nota. Especificaciones técnicas del generador. Obtenido de Saloria (2017). *Turbina hidráulica PLT, PELTON PowerSpout 14-28-56-80-170-200-350* (versión 1) (https://www.hidric.com/wp-content/uploads/2019/07/PLT-ficha-tecnica-es_V1.pdf) consultado el 12 de agosto de 2022.

Tabla 4.

Especificaciones técnicas de la turbina Pelton para la central de generación

Descripción	Parámetro	Valor
Turbina Pelton de un inyector	Chorros	1 de 2-25 mm
	Cucharas	20
	Material	GF30 Nylon 230 mm PCD

Continuación tabla 4.

Cubierta	Plástico LDPE de 6 mm de espesor
Rango de presión estática	130 m
Altura máxima dinámica	3-130 m
Eficiencia	70-80%
Caudal máximo	10 L/s
Caudal mínimo	0.1 L/s
Boquillas suministradas	1 juego cortado a la medida – 1 juego sin cortar de recambio

Nota. Especificaciones técnicas de la turbina. Obtenido de Saloria (2017). *Turbina hidráulica PLT, PELTON PowerSpout 14-28-56-80-170-200-350* (versión 1) (https://www.hidric.com/wp-content/uploads/2019/07/PLT-ficha-tecnica-es_V1.pdf) consultado el 12 de agosto de 2022.

- Subestación eléctrica

A continuación, se presenta un listado de equipos que estarán componiendo la subestación eléctrica para la interconexión con la red de distribución. Para ello se establece un sistema de protección y control que sea capaz de reaccionar ante cualquier falla que se presente, evitando que los equipos se dañen.

Inicialmente se cuenta con un cortacircuitos de potencia, el cual se instala en subestaciones para proteger los transformadores, banco de capacitores, etcétera. Seguido de ello se deben contar con transformadores para separar el circuito de alta tensión, instrumentos de medición, contadores y relés. Asimismo, permite monitorear la calidad de la onda y la medición de armónicos, así como la alimentación de servicios auxiliares.

Además de estos dos equipos, se debe contar con cuchillas desconectoras para evita el flameo. La instalación de un interruptor de potencia es de suma

importancia debido a que es necesario conectar, interrumpir y reestablecer circuitos eléctricos aislando completamente los sistemas eléctricos. Los pararrayos deben ser instalados con el fin de proteger el equipo eléctrico de descargas, descargando el rayo a tierra de una manera segura para las instalaciones.

3.4.3. Costo de instalación y operación de sistema de generación

Posteriormente, se determinó el costo de la instalación de todo el equipo encargado de la generación de energía eléctrica, así como los costos de operación de ésta. Se realizó un inventario de todos los equipos necesarios y se determinó el costo por el equipo, el costo de instalación y el costo de mantenimiento de manera teórica utilizando como referencia un estudio financiero realizado para la instalación de una hidroeléctrica y desescalándolo a la magnitud necesaria para implementarla en este estudio.

Tabla 5.

Costo de inversión de instalación de cuarto de máquinas

Descripción	Costo
Instalaciones provisionales	Q 4,880.03
Movimientos de tierra	Q 24,451.91
Construcción de edificación	Q 24,368.74
Protección contra erosión	Q 6,119.65
Losa de cimentación	Q 7,846.01
Estructura metálica	Q 7,848.84
Techos	Q 7,199.21

Continuación tabla 5.

Acabados	Q 4,159.79
Sistema eléctrico	Q 20,745.60
Sistema de agua potable	Q 4,330.83
Sistema de aguas pluviales	Q 5,236.22
Drenajes	Q 6,690.81
Costo total de cuarto de máquinas	Q123,877.64

Nota. Costo de inversión de instalación del cuarto de máquinas en la planta de tratamiento. Obtenido de Murillo, J (2010). *Diseño básico y costos del proyecto hidroeléctrico Peje*. ICOTEC. (<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6021>) consultado el 17 de agosto de 2022. De dominio público.

Tabla 6.

Costo de inversión de instalación de tuberías

Descripción	Costo
Tubería de acero de 2.5"	Q 20,309.28
Bloques de anclaje	Q 2,545.79
Tubería de presión	Q 14,234.10
Suministro e instalación	Q 13,519.34
Movimientos de tierra	Q 3,529.38
Costo total de instalación de tuberías	Q 54,137.89

Nota. Costo de inversión de instalación de tuberías en la planta de tratamiento. Obtenido de Murillo (2010). *Diseño básico y costos del proyecto hidroeléctrico Peje*. ICOTEC. (<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6021>). consultado el 17 de agosto de 2022. De dominio público.

Tabla 7.

Costo de inversión de montaje electromecánico

Descripción	Costo
Turbina/generador	Q120,147.17
Sistema eléctrico y de control	Q 68,649.88
Costo de montaje electromecánico	Q188,797.04

Nota. Costo de inversión de montaje electromecánico en la planta de tratamiento. Obtenido de Murillo (2010). *Diseño básico y costos del proyecto hidroeléctrico Peje*. ICOTEC. (<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6021>), consultado el 17 de agosto de 2022. De dominio público.

Tabla 8.

Costo de inversión de instalación del canal de restitución

Descripción	Costo
Tubería	Q 2,248.58
Movimiento de tierras	Q 2,237.59
Costo de canal de restitución	Q 4,486.17

Nota. Costo de inversión de instalación de canal de restitución en la planta de tratamiento. Obtenido de Murillo (2010). *Diseño básico y costos del proyecto hidroeléctrico Peje*. ICOTEC. (<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6021>), consultado el 17 de agosto de 2022. De dominio público.

Tabla 9.*Costo de inversión de instalación de subestación y línea de transmisión*

Descripción	Costo
Transformador de potencia	Q168,054.89
Celda de salida al generador	Q 79,359.26
Línea de transmisión	Q 76,785.87
Celda de salida al transformador	Q 60,686.49
Equipo auxiliar y de seguridad	Q 90,617.84
Costo total de subestación y línea	Q475,504.34

Nota. Costo de inversión de instalación de subestación y líneas de transmisión en la planta de tratamiento. Obtenido de Murillo (2010). *Diseño básico y costos del proyecto hidroeléctrico Peje.* ICOTEC. (<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6021>), consultado el 17 de agosto de 2022. De dominio público.

Tabla 10.*Datos de beneficio y costo a 10 años*

Año	Beneficio	Costo
0	Q0.00	Q846,803.08
1	Q130,600.00	Q139,615.17
2	Q130,600.00	Q139,615.17
3	Q130,600.00	Q139,615.17
4	Q130,600.00	Q139,615.17
5	Q130,600.00	Q139,615.17

Continuación tabla 10.

6	Q130,600.00	Q139,615.17
7	Q130,600.00	Q139,615.17
8	Q130,600.00	Q139,615.17
9	Q130,600.00	Q139,615.17
10	Q130,600.00	Q139,615.17

Nota. Datos de beneficio y costo obtenido en un período de 10 años. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

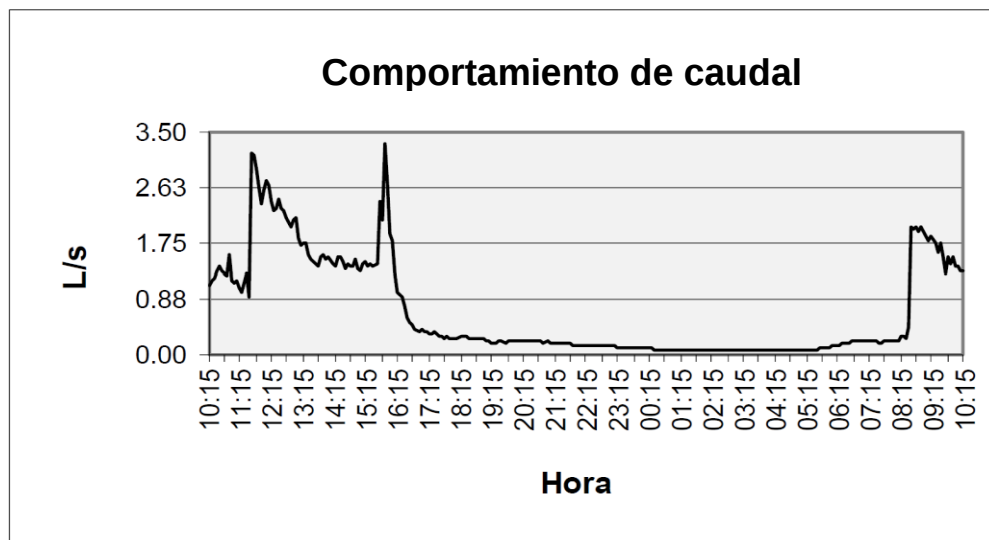
A continuación, se presentan los resultados obtenidos a lo largo de la experimentación, seccionados en cada una de las fases previamente establecidas.

4.1. Caracterización de agua en PTAR

A continuación, se presenta el comportamiento de caudal en salida de la PTAR.

Figura 4.

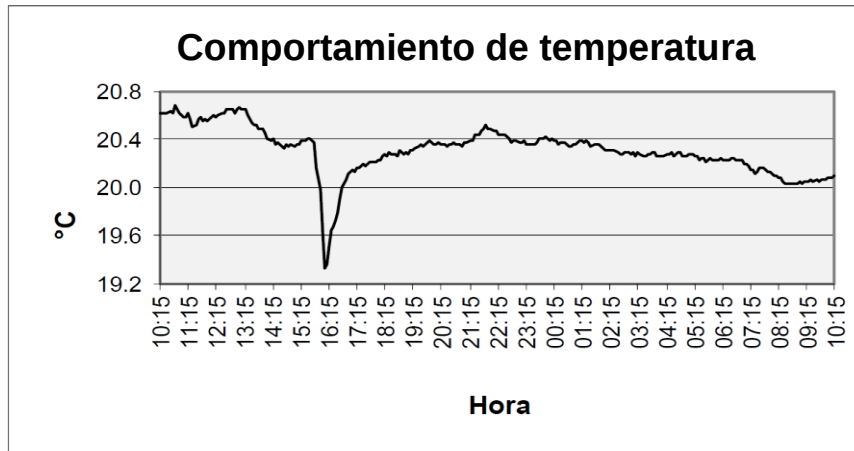
Comportamiento de caudal en salida de la PTAR



Nota. Resultado de análisis fisicoquímico obtenido de muestreo en la planta de tratamiento. Obtenido de ECOQUIMSA (2023). *Informe de monitoreo de agua residual planta de tratamiento municipal Chichorín.* (p.12). ECOQUIMSA

Figura 5.

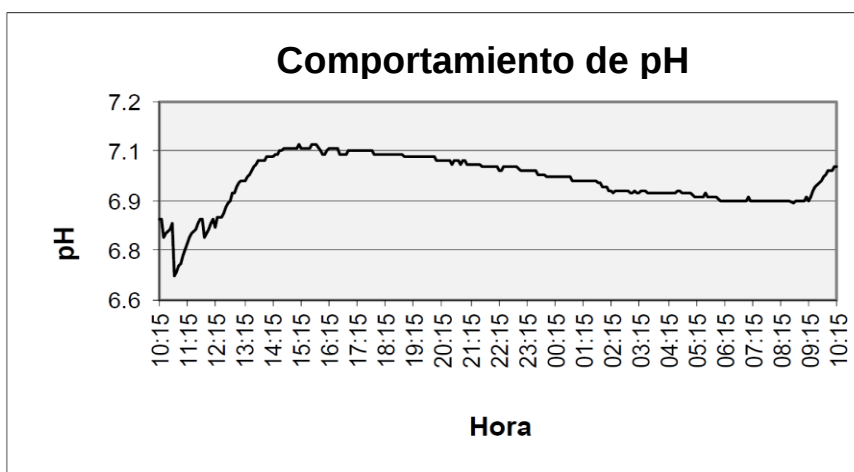
Comportamiento de temperatura en salida de la PTAR



Nota. Resultado de análisis fisicoquímico obtenido de muestreo en la planta de tratamiento. Obtenido de ECOQUIMSA (2023). *Informe de monitoreo de agua residual planta de tratamiento municipal Chichorín.* (p.12). ECOQUIMSA.

Figura 6.

Comportamiento de pH en salida de la PTAR



Nota. Resultado de análisis fisicoquímico obtenido de muestreo en la planta de tratamiento. Obtenido de ECOQUIMSA (2023). *Informe de monitoreo de agua residual planta de tratamiento municipal Chichorín.* (p.12). ECOQUIMSA.

Tabla 11.

Resultados de caudal, temperatura y pH en salida de PTAR

Descripción	Caudal (L/s)	Temperatura (°C)	pH
Caudal promedio	0.660	20.3	7.0
Máximo	3.310	20.7	7.1
Mínimo	0.048	19.3	6.7

Nota. Resultados de caudal, temperatura y pH obtenidos de análisis fisicoquímico en la planta de tratamiento. Elaboración propia, utilizando Microsoft Office.

Tabla 12.

Resultados de análisis fisicoquímico en PTAR

Análisis	Dimensional ⁽¹⁾	Límite de detección	Resultados	LMP	Método de análisis ⁽³⁾
Caudal promedio	L/s	---	0.66	NE ⁽⁴⁾	---
Carga DBO	Kg/día	---	21.6	NE ⁽⁴⁾	---
Cianuro ⁽³⁾	mg/L – CN	0.008	<0.008	1	Spectroquant® Merck 09701
Color ⁽³⁾	U Pt-Co	1	424	500	STM 2120 C
DBO	mg/L – O ₂	4	377	100	COGUANOR NTG 29014h7
DQO ⁽³⁾	mg/L – O ₂	2	599	NE ⁽⁴⁾	COGUANOR NTO 29014h8
Relación DBO/DQO	---	---	1.6	NE ⁽⁴⁾	---
Fósforo total ⁽³⁾	mg/L – P	0.01	8.40	10	Spectroquant® Merck 14848
Grasas y Aceites	mg/L	6.80	68.57	10	COGUANOR NTG 77002h1
Materia Flotante	---	Presente/Ausente	Ausente	Ausente	Organoléptico
Nitrógeno Total ⁽³⁾	mg/L – N	0.01	95.40	20	Spectroquant® Merck 14773
pH Promedio (in-situ)	---	0.02	6.96	6 a 9	STM 4500-H ⁺ B
Sólidos Sedimentables	ml/L	0.1	1.0	NE ⁽⁴⁾	STM 2540 F
Sólidos Suspendidos ⁽³⁾	mg/L	2.61	346.7	100	STM 2540 D
Temperatura Promedio (in-situ)	°C	0.1	20.3	TCR +/- 7	STM 2550 B
Coliformes fecales ⁽³⁾	NMP/100 mL	1.8	790000000	<1x10 ⁴	STM 9221 E

(1) L/s = Litros por segundo; Kg/día = Kilogramos por día; mg/L = ppm; u Pt-Co = Unidades Platino Cobalto; NMP/100 mL = número más probable por 100 mililitros.

(2) STM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd Edition 2017.

(3) Análisis acreditado COGUANOR NTG/ISO/IEC 17025:2017 según OGA-LE-051-13

(4) NE = No establecido por Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Nota. Resultado de análisis fisicoquímico obtenido de muestreo en la planta de tratamiento. Obtenido de ECOQUIMSA (2023). *Informe de monitoreo de agua residual planta de tratamiento municipal Chichorín.* (p.12). ECOQUIMSA.

Tabla 13.*Resultados de análisis de metales pesados en PTAR*

Análisis	Dimensional ⁽¹⁾	Límite de detección	Resultados	LMP	Método de análisis ⁽³⁾
Arsénico	mg/L – As	0.001	0.038	0.10	STM 3114 C
Cadmio	mg/L – Cd	0.010	< 0.010	0.10	STM 3111 B
Cobre	mg/L – Cu	0.055	< 0.055	3.00	STM 3111 B
Cromo (VI)	mg/L – Cr	0.030	< 0.03	0.10	Spectroquant® Merck 14758
Mercurio	mg/L – Hg	0.003	< 0.0026	0.01	STM 3112 B
Níquel	mg/L – Ni	0.135	< 0.135	2.00	STM 3111 B
Plomo	mg/L – Pb	0.058	< 0.058	0.40	STM 3111 B
Zinc	mg/L – Zn	0.026	< 0.193	10.0	STM 3111 B

*(1) mg/L = ppm.**(2) STM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd Edition 2017.**(3) Análisis acreditado COGUANOR NTG/ISO/IEC 17025:2017 según OGA-LE-051-13.*

Nota. Resultado de análisis fisicoquímico obtenido de muestreo en la planta de tratamiento. Obtenido de ECOQUIMSA (2023). *Informe de monitoreo de agua residual planta de tratamiento municipal Chichorín.* (p.12). ECOQUIMSA.

4.2. Sistema de generación

A continuación, se presenta la descripción del sistema de generación.

Tabla 14.*Descripción de sistema de generación a instalar en PTAR*

Parámetro	Descripción
Potencial eléctrico	206.84 kW
Turbina	Pelton de un inyector
Generador	Cuatro pares de polos con imanes permanentes de tres fases
	Cortacircuitos de potencia

Continuación tabla 14.

Sistema de protección y control	Transformadores
	Cuchillas desconectoras
	Interruptor de potencia
	Pararrayos
	Sistema de tierras

Nota. Descripción del sistema de generación propuesto para la planta de tratamiento de aguas residuales. Elaboración propia, utilizando Microsoft Word.

Tabla 15.

Capacidad de generación de PTAR

Hora	Caudal (L/s)	Caudal (m ³ /s)	Potencial eléctrico (kW)
0:15	0.00	0.00	0.000
1:15	0.00	0.00	0.000
2:15	0.00	0.00	0.000
3:15	0.00	0.00	0.000
4:15	0.00	0.00	0.000
5:15	0.00	0.00	0.000
6:15	0.20	0.0002	12.498
7:15	0.30	0.0003	18.747
8:15	1.89	0.00189	118.106
9:15	1.20	0.0012	74.988
10:15	1.50	0.0015	93.735
11:15	3.20	0.0032	199.967
12:15	2.65	0.00265	165.598
13:15	1.75	0.00175	109.357
14:15	1.50	0.0015	93.735
15:15	3.31	0.00331	206.841
16:15	1.02	0.00102	63.739
17:15	0.25	0.00025	15.622
18:15	0.23	0.00023	14.373

Continuación tabla 15.

19:15	0.35	0.00035	21.871
20:15	0.25	0.00025	15.622
21:15	0.15	0.00015	9.373
22:15	0.50	0.0005	31.245
23:15	0.02	0.00002	1.250
0:15	0.00	0.00	0.000
1:15	0.00	0.00	0.000
Potencial eléctrico total			1266.67 kW

Nota. Capacidad de generación diaria de la planta de tratamiento de aguas residuales. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

4.3. Costo de instalación y operación de sistema de generación

A continuación, se presenta el costo de instalación y operación del sistema de generación.

Tabla 16.

Costo de inversión de sistema de generación

Descripción	Costo
Instalación de tuberías	Q 54,137.89
Montaje electromecánico	Q188,797.04
Canal de restitución	Q 4,486.17
Subestación y línea de transmisión	Q475,504.34
Cuarto de máquinas	Q123,877.64
Inversión total	Q846,803.08

Nota. Costo de inversión de instalación de sistema de generación en la planta de tratamiento. Obtenido de Murillo (2010). *Diseño básico y costos del proyecto hidroeléctrico Peje*. ICOTEC. (<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6021>), consultado el 17 de agosto de 2022. De dominio público.

Tabla 17.*Costo operativo de sistema de generación*

Descripción	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Supervisor	1	Q 48,281.26	Q 48,281.26
Personal operativo	1	Q 36,210.89	Q 36,210.89
Gastos administrativos	1	Q 15,087.91	Q 15,087.91
Mantenimientos semestrales	2	Q 8,852.54	Q 17,705.08
Materiales y repuestos	1	Q 22,330.04	Q 22,330.04
Costo total de operación y mantenimiento			Q139,615.17

Nota. Costo operativo anual de la planta de tratamiento de aguas residuales. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Tabla 18.*Análisis de costo beneficio*

Descripción	Beneficio
Tasa de interés	3%
VAN Beneficio	Q1,114,044.49
VAN Costo	Q2,037,748.80
B/C	0.55

Nota. Resultado de análisis de beneficio/costo para la instalación del sistema de generación. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- ¿El agua se está tratando correctamente en la PTAR y no perjudicará el sistema de generación hidroeléctrica provocando que se generen mantenimientos recurrentes que aumenten el costo de operación?

Estableciendo el estado actual de la planta de tratamiento de aguas residuales municipal Chichorín, mediante un muestreo compuesto con duración de 24 horas, fue posible evidenciar que la planta de tratamiento cuenta con una gran cantidad de oportunidades de mejora que permitan un mejor tratamiento de las aguas residuales, con el fin de mejorar la calidad de agua de salida.

Uno de los parámetros más alarmantes de los resultados obtenidos fue la concentración de coliformes fecales presentes en el agua de salida, ya que se encontraba muy por encima del límite establecido por el Acuerdo Gubernativo 236-2006 ($<1 \times 10^4$ NPM/100mL), con una concentración de $79,000 \times 10^4$ NPM/100mL. Por lo general las coliformes fecales son un parámetro sencillo de manejar, ya que su eliminación se genera mediante la aplicación de cloro en la salida de la planta de tratamiento.

Es por ello por lo que es necesario realizar una revisión del sistema de cloración actual, que se hace mediante el contacto con pastillas, y determinar si es posible realizar un cambio a un sistema de aplicación por goteo, en el que se hace una solución líquida de cloro y agua para después aplicarlo directamente en el agua y que en el transcurso del serpentín instalado se realice la disminución en la concentración de coliformes.

Es posible que, durante la medición realizada, una de las pastillas se haya atascado y no permitiera el contacto con el agua, evitando que se diera esta disminución en la concentración, por lo que también es recomendable realizar un muestreo previo que permita evaluar si fue un fallo puntual del sistema o si es necesario cambiarlo completamente.

Además de las coliformes fecales, el agua analizada cuenta con otros parámetros por encima de lo establecido por el acuerdo gubernativo. Dichos parámetros se ven relacionados directamente con la eliminación de contaminación que se genera en el tratamiento aeróbico de la PTAR y son los siguientes: sólidos suspendidos (346.7 mg/L), grasas y aceites (68.57 mg/L), DBO (377 mg/L – O₂) y nitrógeno (95.40 mg/L - N). La planta de tratamiento cuenta con un sistema de aireación mediante bombas sumergible, pero una de las bombas que se encarga de la aireación no está funcionando actualmente, por lo que la concentración de oxígeno en los tanques es muy baja para que la planta pueda operar correctamente y se reduzca la contaminación del agua que entra al sistema.

El DBO refleja que la contaminación en el agua es muy alta y esta contaminación genera que la calidad de los lodos presentes en el sistema sea mala, ya que no flocculan ni sedimentan adecuadamente. La repercusión de esta mala calidad de lodos se ve reflejada en la cantidad de sólidos suspendidos en el agua, que también se encuentra fuera de parámetro. Esto sucede porque al no sedimentar correctamente, los lodos son arrastrados hacia la salida de la planta, aumentando la concentración en el parámetro mencionado. Otro factor que puede afectar al sistema es la alta concentración de grasas y aceites, ya que la presencia de estas puede provocar desestabilización en el sistema y promover el crecimiento de filamentosa que atrape burbujas de aire en el tanque de aireación y se provoquen rebalses en el sistema.

Estos parámetros pueden ser reducidos de manera significativa mediante dos métodos que aseguran el funcionamiento adecuado de la planta de tratamiento. Uno de ellos es la instalación de una nueva bomba que permita la aireación adecuada en el agua y con ello se promueva el crecimiento bacteriano natural de esta para que se reduzca la contaminación y se propicie la generación de lodos sanos y de buena calidad que floculen y se sedimenten adecuadamente.

Una vez evaluado el comportamiento de la planta al instalar la bomba de aireación y dejando un período de estabilización de aproximadamente tres meses, se puede realizar otro muestreo que refleje el comportamiento de la planta. Si los resultados son negativos, será necesario desplazar la población bacteriana que se encuentra habitando el sistema mediante la aplicación de un cultivo bacteriano que sea capaz de dominarlo y que actúe de manera adecuada para la reducción de contaminación.

El nitrógeno, por su lado, es un parámetro que comúnmente genera problemas en las plantas de tratamiento, ya que su eliminación se complica al no tener un sistema de tratamiento que cuente tanto con una sección aeróbica y una anaerobia. Esto suceda ya que la eliminación de nitrógeno se puede dar mediante este ciclo en el que el agua atraviesa por ambas fases. Es por ello por lo que sería de utilidad la instalación de un contactor anóxico que permita que el agua atravesase por ambas fases y se genere la eliminación de nitrógeno adecuadamente.

- ¿Cuál será la inversión necesaria para la implementación de generación hidroeléctrica en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de San Lucas Sacatepéquez?

Siguiendo con el caudal de salida de la planta de tratamiento, siendo este de $0.00331 \text{ m}^3/\text{s}$ en su máximo operativo actual y de $0.00066 \text{ m}^3/\text{s}$ en promedio, se estableció que el potencial eléctrico de la planta de tratamiento es de 41.24 kW, lo cual se traduce a una capacidad de generación 1.0MWh. Estos resultados se obtuvieron tomando en consideración el promedio del caudal de la planta de tratamiento; sin embargo, es posible observar en la figura en la que se ilustra el comportamiento del caudal, que la planta de tratamiento no recibe caudal durante aproximadamente 14 horas, por lo que su operación y generación sería de aproximadamente 10 horas en el transcurso del día. Este valor puede cambiar dependiendo de la época del año, ya que existe una tubería de aguas pluviales que se unifica en la salida de la PTAR, pero que no fue de utilidad ya que las mediciones respectivas se realizaron en época no lluviosa.

La capacidad de generación de la planta de tratamiento demuestra ser levemente viable, ya que es equivalente a la generación de aproximadamente 820 paneles solares comerciales de 300W, que son comúnmente utilizados de manera comercial. Es por ello por lo que se establece que la capacidad de generación de la planta es capaz de suplir y ayudar con la reducción significativa de la factura de energía eléctrica mensual con la cual cuenta la planta de tratamiento para su operación. Esto podrá representar un ahorro útil en el presupuesto de la municipalidad de San Lucas Sacatepéquez.

Si el objetivo de la generación es ser participante del mercado eléctrico y vender energía, se deberá evaluar el aumento de la capacidad de generación mediante algún método, como lo es el aumento del caudal mediante la conexión

de más casas al sistema, de modo que el caudal aumente. De esta manera se podrá evaluar su actuación como un Generador Distribuido Renovable en el mercado. De momento se considera que la generación es muy baja para participar en el mercado y la energía generada se puede utilizar únicamente de manera local.

- ¿Cómo se verá afectado el costo operativo de la planta de tratamiento de aguas residuales utilizando la energía generada con el caudal de salida?

Determinando la viabilidad del sistema a instalar, es posible evaluar el costo de inversión del sistema para que sea considerado dentro del presupuesto. Para ello fue necesario evaluar tanto la compra, instalación y mantenimiento de los equipos, como el personal que se encontrará a cargo de la supervisión de éstos. El costo total de inversión se compone de cinco grupos de costos que son, las tuberías, el cuarto de máquinas, el montaje electromecánico, el canal de restitución y la subestación eléctrica y línea de transmisión.

En el caso de las tuberías, se tomó en cuenta el costo de la tubería, el movimiento de tierras, los bloques de anclaje, el suministro y la instalación, lo cual resultó en un costo total de Q 54,137.89. La instalación del cuarto de máquinas resultó en un costo total de Q123,877.64, compuesta de las instalaciones provisionales, movimientos de tierra, todas las construcciones, el sistema eléctrico, de agua potable y los drenajes.

El canal de restitución, que constaba básicamente de la tubería y el movimiento de tierras necesario para la instalación, constó de Q 4,486.17. El montaje electromecánico compuesto de la turbina y generador, el sistema eléctrico y de control obtuvo un costo general de Q188,797.04. Por último, y el costo representativo más alto, fue el de la subestación y línea de transmisión.

Para ello se tomó en cuenta la celda de salida al generador, de salida al transformador, el transformador de potencia, el equipo auxiliar y la línea de transmisión; se obtuvo un costo total de Q 475,504.34.

En total se obtuvo un costo de inversión total de Q 846,803.08, para que el sistema completo se encontrara operando. Además, se tomó en cuenta el costo de la operación y mantenimiento, el cuál constaba del personal, los gastos administrativos, mantenimientos y repuestos, con un total de Q 139,615.17.

De parte de la unidad de gestión ambiental municipal se indicó que la planta de tratamiento se basa en un programa de mantenimiento en el que se realiza una limpieza de rejillas diaria, se realiza una limpieza de trampa de grasa semanal, una limpieza de desarenador al mes y dos extracciones de lodos al año. Asimismo, se indicó que se cuenta con una persona encargada de la supervisión y mantenimiento del sistema completo y que se realizan dos revisiones y mantenimientos anuales de los equipos instalados en la planta de tratamiento.

Todo esto se traduce a un costo anual de Q 53,800.00. A este monto es necesario agregar el costo mensual de consumo energético, el cual es de aproximadamente Q 2,900.00 debido al consumo de los equipos de aireación y la iluminación de las instalaciones. Tomando en cuenta dicho costo, este proyecto presenta un gasto anual de Q 88,600.00 que puede incrementar dependiendo de los mantenimientos correctivos o cambios de equipos que sean necesarios a la largo del año.

Debido a que la generación de la planta de tratamiento es muy baja como para participar en el mercado eléctrico guatemalteco, es posible optar por vender la energía de manera local; específicamente, a la empresa aledaña a las instalaciones de la planta de tratamiento, que se dedica a la extracción de agua

potable mediante pozos. Dicha empresa se estima que tiene costos aproximados de consumo energético de Q 6,000.00 por los equipos y maquinaria utilizada para realizar las extracciones. Con la generación obtenida del sistema planteado es posible vender la energía sobrante a dicha empresa, obteniendo un retorno estimado de Q 3,500.00 mensuales.

Con dichos datos es posible establecer que, mediante un análisis financiero de costo beneficio con resultado de 0.55, el proyecto no es viable a menos que se incremente el caudal de entrada y de salida de la planta de tratamiento para aumentar la generación y poder vender energía como un GDR en el mercado eléctrico y obtener más ganancias a partir de ello.

CONCLUSIONES

1. La planta de tratamiento de aguas residuales municipal Chichorín de San Lucas Sacatepéquez cuenta con parámetros altos de contaminación, específicamente DBO, grasas y aceites, sólidos suspendidos, nitrógeno, coliformes fecales y no cuenta con la aireación necesaria para la reducción de contaminación por un fallo en la bomba sumergible, por lo que es necesario mejorar la calidad del agua tratada mediante la implementación de nuevos sistemas con el fin de que ésta pueda ser utilizada en equipos de generación hidroeléctrica sin inconvenientes de deterioro o atascamiento.
2. La capacidad de generación del caudal de salida de la PTAR es de 1.0 MWh, suficiente para abastecer de suministro energético a las instalaciones de la planta de tratamiento y la empresa aledaña dedicada a la extracción de agua mediante pozos.
3. El costo de instalación del sistema de generación es de Q 846,803.08 y un costo de operación anual de Q 139,615.17, con un retorno de Q 130,600.00 al mes proveniente del ahorro en la factura de electricidad y la venta de la energía sobrante a la empresa de extracción de agua, lo que obtiene un análisis de beneficio/costo de 0.55.

4. Actualmente el proyecto no es viable debido a la baja generación y a la incapacidad de vender energía a otros consumidores, por lo que es necesario aumentar el caudal de ingreso para que de esta manera aumente la generación y el proyecto se pueda convertir en un GDR capaz de vender energía en el mercado eléctrico, obteniendo así las ganancias necesarias para que sea considerado viable.

RECOMENDACIONES

1. Instalar una nueva bomba de aireación que sea capaz de aumentar la concentración de oxígeno en el sistema, determinar si es necesario el desplazamiento de la biomasa en el sistema mediante la siembra de una especie bacteriana que sea capaz de disminuir los niveles de contaminación y evaluar el correcto funcionamiento del sistema de cloración para la eliminación de las coliformes fecales.
2. Evaluar la oportunidad de venta de energía a la colonia Chichorín, ubicada en las cercanías de la planta de tratamiento, con el fin de establecer una relación comercial que le permita a la planta de tratamiento un mayor ingreso monetario derivado de ello.
3. Aumentar el número de casas conectadas a la planta de tratamiento, con el fin de aumentar también el caudal de manera significativa y con ello el potencial energético del sistema, de tal manera que la energía generada sea suficiente para poder participar en el mercado eléctrico como un GDR y obtener ganancias de dicha generación.
4. Evaluar la capacidad de generación mediante la adición de casas conectadas al sistema o la oportunidad de venta de la energía producida a otros clientes que puedan representar ingresos sustentables para la municipalidad mediante el sistema de generación.

REFERENCIAS

- Alonso E., Quintana-Díaz, B., González-Cardoso, G., Gutiérrez-Arzaluz, M., Ana Martínez-Ordaz, & Lizardi-Ortega, J. (2018). Advanced Oxidation with Nanofilm Photocatalyst's on Stainless Steel Wire as Secondary Treatment of Wastewater. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 7(4) 10-23 <https://doi.org/10.17265/2162-5263/2018.04.001>
- Barquín, L. (2015). *Generación de electricidad con aguas residuales del Río Villalobos*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Botello, A. V. (2005). *Golfo de México: Contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias*. Universidad Autónoma de Campeche, Centro de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México : Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología : Insitutio Nacional de Ecología.
- Bretas Alvim, C., Bes-Piá, M. A., & Mendoza-Roca, J. A. (2020). Separation and identification of microplastics from primary and secondary effluents and activated sludge from wastewater treatment plants. *Chemical Engineering Journal*, 402, (3)126-293. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126293>
- CNEE. (2014). *Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoproductores con Excedentes de Energía*. Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
- Colombo, G. & Lito Velox. (1987). *Manuale dell'ingegnere: Nuovo Colombo*. Hoepli.

De León, V. (2018). *Diseño de investigación de estimación de la capacidad de generación de energía eléctrica como subproducto de la planta de tratamiento de agua potable Lo De Coy, ubicada en el municipio de Mixco de la ciudad de Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Duharte, W., Barrera, E., González, L., & Odales, R. (abril 2021). Estimación del potencial de biogás a partir de la gallinaza. *Revista cubana de Química*, 33(1), 54–69.

Fraenkel, P., Paish, O., Stockholm Environment Institute, Swedish Missionary Council, & IT Power Ltd (Eds.). (1991). *Micro-hydro power: A guide for development workers*. Intermediate Technology Publications Ltd.

Green, D. W., & Southard, M. Z. (Eds.). (2019). *Perry's chemical engineers' handbook* (Ninth edition, 85th anniversary edition). McGraw-Hill Education.

Guzmán, N. (2018). *Diagnóstico e inventario de plantas de tratamiento de agua residual en operación, públicas y privadas del municipio de San Lucas Sacatepéquez, Sacatepéquez*. Universidad de San Carlos de Guatemala.

IRENA. (2021). *Off-grid renewable energy statistics 2021*. IRENA.

Marroquín, C. (2018). *Diseño de la investigación de generación de energía eléctrica a base de biorreactores uasb en una planta de tratamiento de aguas residuales*. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Moran, S. (2018). *An applied guide to water and effluent treatment plant design*. Elsevier.

Murillo, J. (2010). *Diseño básico y costos del proyecto hidroeléctrico Peje*. ICOTEC.

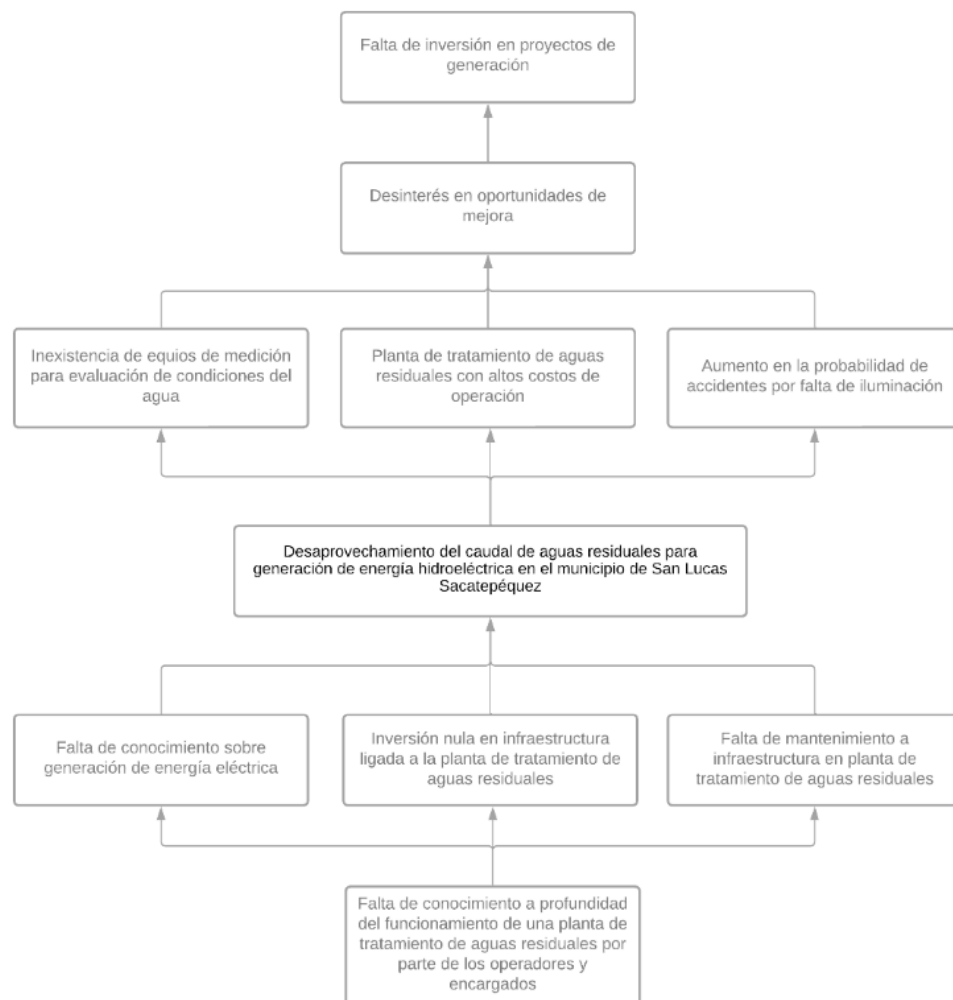
Oficina Internacional del Trabajo. (2014). *Convenio Núm. 169 de la OIT sobre Pueblos Indígenas y Tribales*. Oficina Internacional del Trabajo.

Rabanales, K. (2015). *Evaluación del funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón Chichorin, del municipio de San Lucas Sacatepéquez, diagnóstico y servicios realizados en la municipalidad de San Lucas Sacatepéquez, Guatemala, C.A.* Universidad de San Carlos de Guatemala.

APÉNDICES

Apéndice 1.

Árbol de problema



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1.

Análisis fisicoquímico y de aguas residuales de PTAR

9a avenida 3-08 zona 2 Colonia Alvarado, Mixco, Guatemala
informacion@ecoquimsa.com.gt | ecoquimsa.com | (502) 2322 3600

líderes en
ambiente



INFORME DE MONITOREO DE AGUA RESIDUAL

ING. JULIO ESTUARDO SANTA CRUZ MÁRQUEZ
PLANTA DE TRATAMIENTO MUNICIPAL CHICHORÍN

**2A. AVENIDA 0-71 "A" CASCO URBANO, ZONA 2,
SAN LUCAS, SACATEPÉQUEZ**

PREPARADO POR:

LABORATORIO ECOQUIMSA

9a. avenida 3-08 colonia Alvarado zona 2 de Mixco, Guatemala, Centroamérica
PBX: 2322-3600
ecoquimsa.com



Abril 2023

Continuación anexo 1.

9a avenida 3-08 zona 2 Colonia Alvarado, Mixco, Guatemala
informacion@ecoquimsa.com.gt | ecoquimsa.com | (502) 2322 3600

líderes en
ambiente



Punto de Monitoreo No. 1
Entrada PTAR



Continuación anexo 1.

9a avenida 3-08 zona 2 Colonia Alvarado, Mixco, Guatemala
informacion@ecoquimsa.com.gt | ecoquimsa.com | (502) 2322 3600

**líderes en
ambiente**



MONITOREO DE CAUDAL, TEMPERATURA Y pH

Datos del Cliente

Cliente: Ing. Julio Estuardo Santa Cruz Márquez
Dirección: 2a. avenida 0-71 "A" casco urbano, zona 2, San Lucas Sacatepéquez

Datos de la muestra

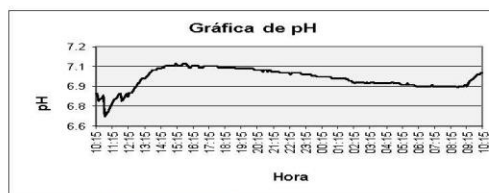
Lugar de muestreo: Planta de tratamiento municipal
Ochiorin
Referencia cliente: Entrada PTAR
Lote: 23-2380
Monitoreo desde: 24 de abril de 2023 (10:15)
Monitoreo hasta: 25 de abril de 2023 (10:15)
Responsable del muestreo: LUIS TAX



L/s	
Promedio	0.66
Máximo	3.31
Mínimo	0.048



°C	
Promedio	20.3
Máximo	20.7
Mínimo	19.3



pH	
Promedio	7.0
Máximo	7.1
Mínimo	6.7

Medición de caudal y temperatura con equipo automático de medición de flujo, marca ISCO modelo 2150, utilizando un vertedero en V de 45°. Mediciones de altura y temperatura a intervalos de 5 min, de acuerdo al procedimiento de medición de caudal PRO25-MUE.

Los presentes resultados son válidos únicamente para la medición realizada en la fecha indicada.
Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización de ECOQUIMSA.



Luis Manuel Sant León
Laboratorio ECOQUIMSA
Lic. Luis Manuel Sant León
Ingeniero Químico
Colegiado No. 8056

Laboratorio ECOQUIMSA
9a. Avenida 3-08 Zona 2 de Mixco
Colonia Alvarado
PBX: (502) 2322-3600
ECOQUIMSA
ecoquimsa.com

Continuación anexo 1.

9a avenida 3-08 zona 2 Colonia Alvarado, Mixco, Guatemala
informacion@ecoquimsa.com.gt | ecoquimsa.com | (502) 2322 3600

líderes en
ambiente



Punto de Monitoreo No. 2
Salida PTAR



Continuación anexo 1.

9a avenida 3-08 zona 2 Colonia Alvarado, Mixco, Guatemala
informacion@ecoquimsa.com.gt | ecoquimsa.com | (502) 2322 3600

**líderes en
ambiente**



INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS

Datos del Cliente

Cliente: Ing. Julio Estuardo Santa Cruz Márquez
Dirección: 2a. avenida 0-71 "A" casco urbano, zona 2, San Lucas Sacatepéquez

Datos de la muestra

Lugar de muestreo:	Planta de tratamiento municipal Chichorin	Horas de descarga:	24.00
Referencia cliente:	Salida PTAR	Muestra simple o compuesta:	Compuesta
Fecha de monitoreo:	24 al 25 de abril de 2023	Responsable del muestreo:	LUIS TAX
Hora de monitoreo:	10:15 a 10:15	Temperatura de almacenaje:	5 °C
Tipo de muestra:	Agua residual ordinaria	Recipiente utilizado:	Plástico, vidrio y bolsa estéril
Código de muestra:	23-2380-1	Método de muestreo:	PRO19-MUE
Lote:	23-2380	Método de preservación:	INS04-MUE
		Ubicación:	N 14°36'04.0" O 90°40'03.7"

Datos de Laboratorio

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 25 de abril de 2023
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 17:15
Fecha de informe: 12 de mayo de 2023

Análisis	Dimensional ⁽¹⁾	Límite de Detección	Resultados	Método de análisis ⁽²⁾
Caudal Promedio*	L/s	---	0.66	---
Carga de DBO	Kg/día	---	21.6	---
Cianuro ⁽³⁾	mg/L - CN ⁻	0.008	< 0.008	Spectroquant® Merck 09701
Color ⁽³⁾	u Pt-Co	1	424	STM 2120 C
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L - O ₂	4	377	COGUANOR NTG 29014h7
Demanda Química de Oxígeno ⁽³⁾	mg/L - O ₂	2	599	COGUANOR NGO 29014h6
Relación DQO/DBO	---	---	1.6	---
Fósforo Total ⁽³⁾	mg/L - P	0.01	8.40	Spectroquant® Merck 1484B
Grasas y Aceites	mg/L	6.80	68.57	COGUANOR NTG 77032h1
Materia Flotante	---	Presente/Ausente	Ausente	Organoléptico
Nitrógeno Total ⁽³⁾	mg/L - N	0.01	95.40	Spectroquant® Merck 14773
pH Promedio (in-situ)*	---	0.02	6.96	STM 4500-H ⁺ B
Sólidos Sedimentables	mL/L	0.1	1.0	STM 2540 F
Sólidos Suspendedos ⁽³⁾	mg/L	2.61	346.7	STM 2540 D
Temperatura Promedio (in-situ)*	°C	0.1	20.3	STM 2550 B
Coliformes fecales ⁽³⁾	NMP/100 mL	1.8	790,000,000	STM 9221 E

(1) L/s = Litros por segundo; Kg/día = kilogramos por día; mg/L = ppm; u Pt-Co = Unidades Platino Cobalto; NMP/100 mL = número más probable por 100 mililitros.

(2) STM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd Edition 2017.

(3) Análisis acreditado COGUANOR NTG/ISO/IEC 17025:2017 según OGA-LE-051-13.

* Datos de Caudal, pH y Temperatura, tomados en la Entrada PTAR.

Los presentes resultados son válidos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.
Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización de ECOQUIMSA.



Luis Manuel Sol León
Laboratorio ECOQUIMSA
Lic. Luis Manuel Sol León
Ingeniero Químico
Colegiado No. 3056

Laboratorio ECOQUIMSA
9a. Avenida 3-08 Zona 2 de Mixco
Colonia Alvarado
PBX: (502) 2322-3600
ECOQUIMSA
info@ecoquimsa.com
Ecoquimsa.com

Continuación anexo 1.

9a avenida 3-08 zona 2 Colonia Alvarado, Mixco, Guatemala
informacion@ecoquimsa.com.gt | ecoquimsa.com | (502) 2322 3600

**líderes en
ambiente**



INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS

Datos del Cliente

Cliente: Ing. Julio Estuardo Santa Cruz Márquez
Dirección: 2a. avenida 0-71 "A" casco urbano, zona 2, San Lucas Sacatepéquez

Datos de la muestra

Lugar de muestreo:	Planta de tratamiento municipal	Muestra simple o compuesta:	Compuesta
	Chichorín	Responsable del muestreo:	LUIS TAX
Referencia cliente:	Salida PTAR	Temperatura de almacenaje:	5 °C
Fecha de monitoreo:	24 al 25 de abril de 2023	Recipiente utilizado:	Plástico
Hora de monitoreo:	10:15 a 10:15	Método de muestreo:	PRO19-MUE
Tipo de muestra:	Agua residual ordinaria	Método de preservación:	INS04-MUE
Código de muestra:	23-2380-1	Ubicación:	N 14°36'04.0"
Lote:	23-2380		O 90°40'03.7"

Datos de Laboratorio

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 25 de abril de 2023
Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 17:15
Fecha de informe: 12 de mayo de 2023

Análisis	Dimensional ⁽¹⁾	Límite de Detección	Resultados	Método de análisis ⁽²⁾
Arsénico	mg/L - As	0.0010	0.038	STM 3114 C
Cadmio	mg/L - Cd	0.010	< 0.010	STM 3111 B
Cobre	mg/L - Cu	0.055	< 0.055	STM 3111 B
Cromo (VI)	mg/L - Cr	0.03	< 0.03	Spectroquant® Merck 14758
Mercurio	mg/L - Hg	0.0026	< 0.0026	STM 3112 B
Níquel	mg/L - Ni	0.135	< 0.135	STM 3111 B
Plomo	mg/L - Pb	0.058	< 0.058	STM 3111 B
Zinc	mg/L - Zn	0.026	0.193	STM 3111 B

(1) mg/L = ppm.

(2) STM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd Edition 2017.

Los análisis de este informe son acreditados COGUANOR NTG/ISO/IEC 17025:2017 según OGA-LE-051-13.

Los presentes resultados son válidos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.

Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización de ECOQUIMSA.



Luis Manuel Sui León
Laboratorio ECOQUIMSA
Lic. Luis Manuel Sui León
Ingeniero Químico
Colegiado No. 3056

Laboratorio ECOQUIMSA
9a. Avenida 3-08 Zona 2 de Mixco
Colonia Alvarado
PBX: (502) 2322-3600
Ecoquimsa.com
Ecoquimsa

5/5

Nota. Se presentan los resultados obtenidos en el análisis. Obtenido de ECOQUIMSA (2022). Informe resultado de análisis. (p. 1). ECOQUIMSA.

Anexo 2.

Ficha técnica de turbina Pelton y generador



PowerSpout Technical Specifications

PowerSpout PLT, TRG and LH



Valid from August 2017

Continuación anexo 2.

PowerSpout Contact details

Web: www.powerspout.com

PowerSpout is a product proudly designed and manufactured by:

EcolInnovation Ltd
671 Kent Road
New Plymouth R.D.1
New Zealand 4371

Web: www.ecoinnovation.co.nz

If you need to contact EcolInnovation by phone then email first via our web site and check the local time in NZ if calling from overseas. Business hours are 9:00am to 5:00pm (NZ time) weekdays only. EcolInnovation is closed for up to 3 weeks over the Christmas break.

Notice of Copyright

Copyright © 2017 All rights reserved

Notice of Trademark

PowerSpout – is a USA registered Trademark

Notice of Company Registration

EcolInnovation – is a NZ Registered Limited Company

Disclaimer

UNLESS SPECIFICALLY AGREED TO IN WRITING, ECOINNOVATION LIMITED:

(a) MAKES NO WARRANTY AS TO THE ACCURACY, SUFFICIENCY OR SUITABILITY OF ANY TECHNICAL OR OTHER INFORMATION PROVIDED IN ITS MANUAL OR OTHER DOCUMENTATION.

(b) ASSUMES NO RESPONSIBILITY OR LIABILITY FOR LOSS OR DAMAGE, WHETHER DIRECT, INDIRECT, CONSEQUENTIAL OR INCIDENTAL, WHICH MIGHT ARISE OUT OF THE USE OF SUCH INFORMATION. THE USE OF ANY SUCH INFORMATION WILL BE ENTIRELY AT THE USER'S RISK.

Revision history

- 1.0 2013 issued
- 1.1 revised August 2017 by H.P.

Continuación anexo 2.

PowerSpout

Technical Specifications

CONTENTS

1. Introduction	1
2. PowerSpout turbine voltage ratings	3
2.1. PowerSpout PLT	4
2.2. PowerSpout TRG	4
2.3. PowerSpout LH	4
3. Turbine specifications	5
3.1. PowerSpout PLT	6
3.2. PowerSpout TRG	7
3.3. PowerSpout LH and LH Pro	8
3.4. PowerSpout LH-mini	9
3.5. PowerSpout TRG Twin Packs	10



PowerSpout PLT turbines are often installed in multiples to handle higher flows.

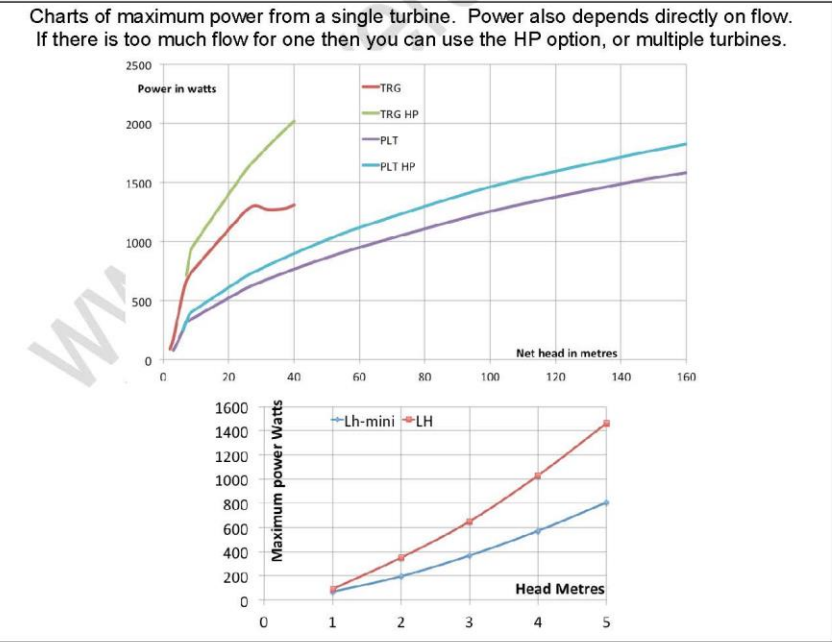
1. Introduction

PowerSpout turbines are micro-hydro generators that convert the potential energy of a watercourse to electricity. Water is used to push the turbine rotor blades that spin the magnetic rotor of the alternator (or PMA), which generates electricity (3-Phase AC power) internally that is then rectified to DC for output from the turbine.

There is no such thing as a standard model because every site is different. Turbines are built to match the site and drop-shipped direct to site all over the world from New Zealand using DHL. Before ordering a turbine you must accurately survey the site head, flow, pipe length, transmission-wiring distance etc, and select a suitable operating voltage for the application. Without this information we cannot supply a turbine. (The exception is the **PLT Cube** model (available from 2018), which is a standard product, for Asia, Africa and South America only.)

There is a range of PowerSpout models that can each operate over a range of heads and flows. The Pelton is often the best choice due its low RPM, but other models can handle more flow:

Model	Head (m)	Flow (l/s)
PowerSpout PLT (Pelton)	3 – 130	0.1 – 10
PowerSpout TRG (Turgo)	2 – 30	8 – 16
PowerSpout LH (Low Head)	1 – 5	25 – 56
PowerSpout LH-mini	1 – 5	14 - 31

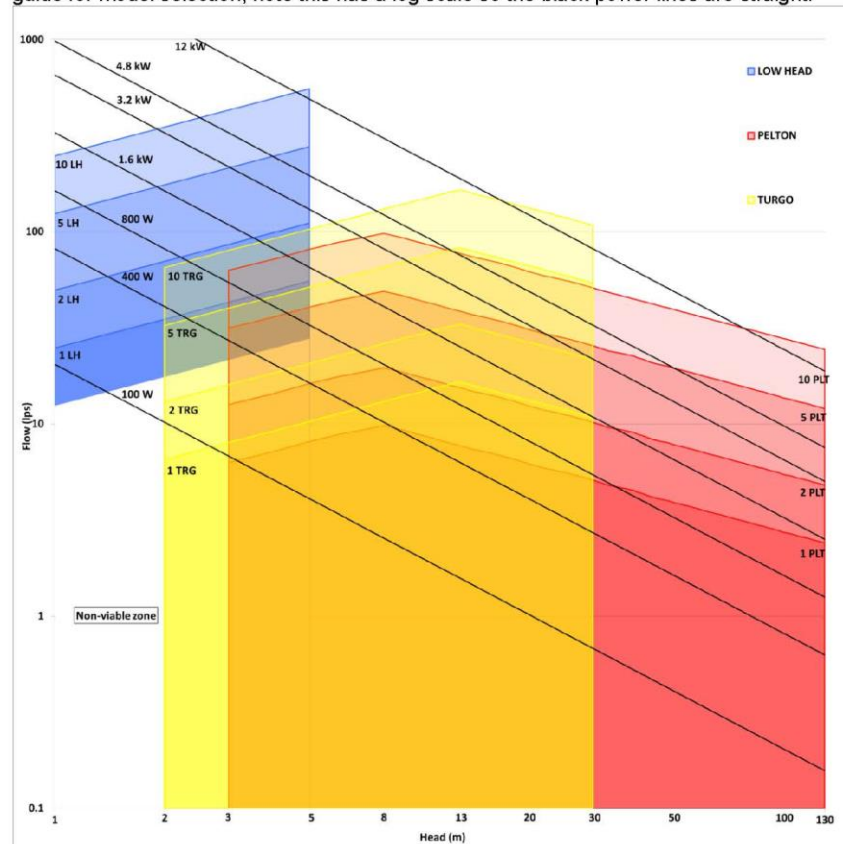


Continuación anexo 2.

PowerSpout

Technical Specifications

A summary graph of turbine performance is presented below. This can be used as a quick guide for model selection; note this has a log scale so the black power lines are straight.



PowerSpout Model Selection Chart

For the head and flow rate at your site the above chart will quickly give you the maximum power you can generate (refer to black angled lines that indicate 100W to 12kW). Below 100W hydro generation is often not viable.

The coloured zones refer to the range for each product type:

The red lines are 1, 2, 5, 10 PowerSpout Pelton (PLT) turbines respectively

The yellow lines are 1, 2, 5, 10 PowerSpout Turgo (TRG) turbines respectively

The blue lines are 1, 2, 5, 10 PowerSpout Low Head (LH) turbines respectively

For example a site with a 20m head and flow of 10l/s can generate about 1000 W with 1 TRG or 2 PLT turbines.

Once you have identified the most suitable turbine type(s), use the Advanced Calculation Tools at www.powerspout.com to perform accurate site calculations.

2. PowerSpout turbine voltage ratings

PowerSpout PLT and TRG turbines are also identified by their design voltage to suit the site and system design. The turbine abbreviation (PLT, TRG) is followed by a number that indicates the voltage at which it will work best on your site, also known as the maximum power point voltage (MPPV or V_{MPP}). This will also be the transmission cable voltage.

For example:

- PowerSpout PLT 28 has a V_{MPP} of 28V for connection directly to 24V battery bank (controlled by a PWM diversion charge controller). 28V is the bulk charging voltage for a 24V battery, so the turbine will mostly operate at this voltage or close to it.
- PowerSpout PLT 80 has a V_{MPP} of 80V for use with a 250V MPPT charge controller and 48V battery bank. 80V is high enough to charge a 48V battery whereas the PLT40 can only charge 12 or 24V batteries.
- PowerSpout PLT 200 has an V_{MPP} of 200V (connect to grid via grid-tied inverter, not an option offered for the new PLT Cube)

For PowerSpout LH turbines, for example the LH200, the 200 is not the V_{MPP} but the maximum open circuit voltage (Voc) at turbine runaway. This is because there are no LH turbines that connect directly to batteries. All LH turbines require MPPT charge controllers for battery charging or the use of a grid-connect inverter (which always contains MPPT software too).

For example a Powerspout LH200 has a V_{MPP} of about 100V and will work fine with a 250V MPPT charge controller and 48V battery bank. It will never exceed 250V so it is safe to use with this controller.

The relationship between Voc and V_{MPP} is stated below:

- PLT and TRG turbines Voc is approximately $3 \times V_{MPP}$
- LH turbines Voc is approximately $2 \times V_{MPP}$

The optional **PowerClamp** device can be fitted to a turbine so as to prevent the open circuit from arising. Voc in such cases is only slightly higher than V_{MPP}

The PowerSpout **PLT Cube** has fewer voltage options. Please see the manual for details.

Continuación anexo 2.

PowerSpout

Technical Specifications

2.1. PowerSpout PLT

Common versions of PowerSpout PLT

	Off-grid*					On-grid	
PLT model	14	28	40	56	80	170	200
Max cable length m	50	150	250	500	1000	1000	1000
Operating cable V	14	28	40	56	80	170	200
Max open circuit V	38	75 ELV US/EU	120 ELV NZ/AUS	150	220	<450	<550
Regulator/inverter	PWM	PWM	MPPT	PWM	MPPT	Grid-tie	Grid-tie

* All off grid MPPT turbines can charge 12, 24 or 48 V battery bank except PLT40 that can only be used in 12 and 24 V systems.



PLT turbines are suitable for many applications.

2.2. PowerSpout TRG

Common versions of PowerSpout TRG

	Off-grid				On-grid	
TRG model	28	40	56	80	170	200
Max cable length m	150	250	500	1000	1000	1000
Operating cable V	28	40	56	80	170	200
Max open circuit V	75 ELV US/EU	120 ELV NZ/AUS	150	220	<450	<550
Regulator/inverter	PWM	MPPT	PWM	MPPT	Grid-tie	Grid-tie

*All off grid MPPT turbines can charge 12, 24 or 48 V battery bank except TRG40 that can only be used in 12 and 24 V systems.

2.3. PowerSpout LH

Common PowerSpout LH and LH Pro products

All LH and LH Pro products connect via MPPT regulators or grid-tied inverters. There are no direct battery options available.

- **LH150, LH150Pro and LH150-mini** – use with MPPT regulator rated for up to 150 VDC charging 12/24 VDC batteries. Cable voltage may be as low as 60 VDC.
- **LH250, LH250Pro and LH250-mini** – use with MPPT regulator rated for up to 250 VDC charging 12/24/48 VDC batteries. Cable voltage may be as low as 80 VDC.
- **LH400, LH400Pro and LH400-mini** – use with MPPT regulator or grid-connect inverter rated for up to 400 VDC. Cable voltage may be as low as 140 VDC.

Continuación anexo 2.

PowerSpout

Technical Specifications

3. Turbine specifications

For wiring diagrams, installation drawings/pictures and circuit diagrams refer to the installation manual. All parts and assemblies are fully described with drawings and pictures in product installation manuals. The following provides a summary.

All PowerSpout turbines have the following specifications:

PowerSpout Specifications	
Generator	10.5 in (270mm) 3-phase Smart Drive permanent magnet generator (PMG)
Generator efficiency	> 70% and up to 80% in ideally matched conditions
Wattage single	100 - 1200 W standard. Custom HP version up to 1600 W (<i>not</i> for PLT cube)
Wattage stacked (2-10 units)	0.2-12 kW standard. Custom up to 16 kW
Current rating	Up to 32 amp standard, up to 50 amp surcharge applies
Running speed	200 - 1600 rpm (up to 2000 rpm for TRG)
Watt/rpm	Up to 0.7 W/rpm standard. Up to 1.0 W/rpm high power ("HP") versions with MPPT (<i>not</i> for PLT cube)
PowerSpout Materials	
Case	LDPE
Drive shaft	stainless steel (solid for all except hollow on PLT cube)
All fasteners and fixings	stainless steel
Recycled content	up to 68%



PowerSpout PLT



PowerSpout TRG



PowerSpout LH

The following section specifies characteristics of each turbine type, and the variations found in the PLT Cube, and TRG "twin packs" offered at a reduced price.

Continuación anexo 2.

PowerSpout

Technical Specifications

3.1. PowerSpout PLT

Runner	Pelton wheel (Impulse turbine)	
Jets	1 or 2, range 2-25mm each	
Maximum water flow rate	10 l/s (at around 8 m head)	
Pelton wheel	Number of spoons on rotor 20 Pelton spoon width 70 mm Length of spoon 62 mm Maximum jet diameter 25 mm Hub thickness 17 mm Hub fixing hole 12 mm Outside diameter 290 mm Running diameter 230-240 mm	
Pelton rotor hub	GF30 Nylon 230mm (9 inch) PCD	
Pelton spoons	GF30 Nylon	
Casing	LDPE plastic case 6mm thick (twin pack cases are 4mm)	
Static head range	3 to 160m (10 – 525 feet)	
Dynamic head range	3 to 130m (10 – 430 feet)	
Maximum flow/turbine	8 -10 l/s (130 – 160 gpm)	
Minimum flow/turbine	0.05 l/s (0.8 gpm) (special reduced core Smart Drive needed)	
PLT model	PLT standard (World Market)	PLT cube (Asia, Africa and South America)
Bearings	Front 6205-2Z OD 52mm ID 25mm, and rear 6005-2Z OD 47mm ID 25mm	Front and rear 6005-2Z OD 47mm ID 25mm Tubular drive shaft
Rectification	100 amp water cooled rectifier	50A air cooled
Dimensions	470 x 400 x 430 mm (18.5 x 15.7 x 17 inches)	420 x 420 x 420mm
Weight	Net Weight 23kg. Up to 25kg packed weight.	Weight less than 15kg. No carton reqd. Can be sent as twin pack.
Jets supplied	1 set cut to calculated size + 1 spare uncut set	Jets cut on site.
WARRANTY		
PLT (wet side) rotor	5 years on wet site rotor alone	
PLT PMA stator and rotor	less than 1200 W	5 years on stator and rotor
PLT all except bearings	less than 1200 W	3 years (bearings 1 year)
PLT all except bearings	between 1200-1600 W	2 years (bearings 1 year)
PLT Cube	One-year warranty on PLT cube.	
Bearings	Same as turbine if disposable automatic grease cans are purchased at time of turbine order, else 1 year applies	



Continuación anexo 2.

PowerSpout

Technical Specifications

3.2. PowerSpout TRG

Runner	Turgo wheel (Impulse turbine)	
Jets	1-4, range 2-22mm each	
Turgo wheel	Number of spoons on rotor	12
	Spoon width	45 mm
	Length of spoon	65 mm
	Maximum jet diameter	25 mm
	Hub thickness	50 mm
	Rim fixing hole	5 mm
	Outside diameter	180 mm
	Running diameter	90 mm
Turgo rotor material	GF30 Nylon 90mm PCD	
Casing	LDPE plastic top case 3mm thick, bottom case 8mm thick	
Bearings	Front and rear 6005-2Z OD 47mm ID 25mm	
Static head range	2 - 40m (130 feet)	
Maximum Dynamic head	2 - 30 m (6.6 - 100 feet) Higher is possible but please consult.	
Maximum flow/turbine	16 l/s (254 gpm)	
Minimum flow/turbine	8 l/s (127 gpm) - less possible, but PLT turbine is then a better option	
Jets supplied	1 set cut to calculated size + 1 spare uncut set	
Rectification	100 amp air cooled rectifier	
Dimensions	430 x 410 x 350 mm (16.9 x 16.1 x 13.8 inches)	
Weight	Net Weight 15kg, with pipe fittings 28kg. Up to 30kg packed weight	
WARRANTY		
TRG (wet side) rotor		5 years on wet site rotor alone
TRG except bearings		3 years (bearings 1 year) Twin packs have only one year warranty
Bearings	Same as turbine if automatic disposable grease cans are purchased at time of turbine order, else 1 year applies.	



Continuación anexo 2.

PowerSpout

Technical Specifications

3.3. PowerSpout LH and LH Pro

Runner	154mm stainless steel propeller (Reaction turbine)
Casing	LDPE plastic case 3mm thick
Bearings	6005 OD47mm ID25mm
Static head range	3 – 16 feet (1 to 5m)
Maximum flow/turbine	55 l/s (880 gpm)
Minimum flow/turbine	25 l/s (400 gpm)
Rectification	100 amp air cooled rectifier
Dimensions	Diameter 300mm x length 1050mm (12 inches x 42 inches)
Weight	LH 23 kg (51 pounds) packed weight. LH Pro 30 kg (66 pounds) packed weight.
Warranty	2 years extendable to 7 years Stainless propeller has a 3 year durability warranty



Continuación anexo 2.

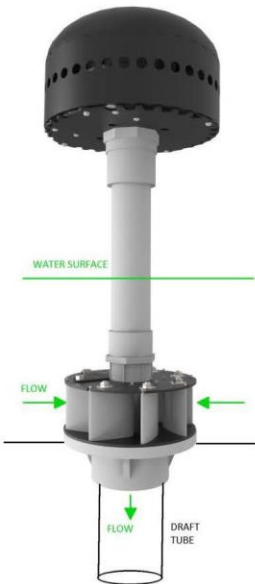
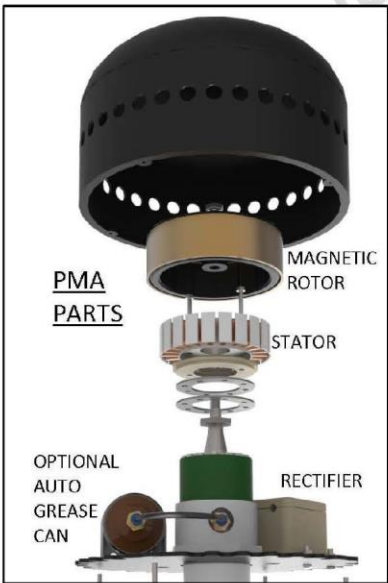
PowerSpout

Technical Specifications

3.4. PowerSpout LH-mini

Runner	100mm stainless steel propeller (Reaction turbine)
Casing	LDPE plastic case 3mm thick
Bearings	6005 OD47mm ID25mm
Static head range	3 – 16 feet (1 to 5m)
Maximum flow/turbine	32 l/s (520 gpm)
Minimum flow/turbine	14 l/s (220 gpm)
Maximum output current	10 A
Dimensions	Diameter 300mm x length 800 (12 inches x 32 inches)
Weight	14.4 kg (32 pounds)
Warranty	2 years extendable to 7 years Stainless propeller has a 3 year durability warranty

Head		Max. Flow approx		Min. Flow approx		Max. Watts	Min. Watts	Turbine Eff'
m	ft	l/s	GPM	l/s	GPM			
1.0	3.3	14.1	225	7.1	112	68	31	49.0
1.5	4.9	17.3	275	8.7	138	126	57	49.5
2.0	6.6	20.0	318	10.0	159	196	88	50.0
2.5	8.2	22.4	356	11.2	178	277	125	50.5
3.0	9.8	24.5	389	12.2	195	368	165	51.0
3.5	11.5	26.5	421	13.2	210	466	210	51.2
4.0	13.1	28.3	450	14.1	225	572	257	51.5
4.5	14.8	30.0	477	15.0	239	685	308	51.7
5.0	16.4	31.6	503	15.8	251	807	363	52.0



Continuación anexo 2.

PowerSpout

Technical Specifications

3.5. PowerSpout TRG Twin Packs

Twin packs provide you with the opportunity to buy 2 turbines at once for a reduced price. Both turbines in a twin pack are for identical site data only.

Twin packs are a cost-effective option made possible by some small changes that result in lower production and freight costs. Costs are further reduced due to a shorter warrantee period and longer production lead times of up to 4 weeks.

The TRG twin pack includes 2 turbines, each of which is:

- Suited to sites with a head of 2-30m, and maximum flow 16l/s each
- Models available TRG 40/56/80 turbines
- Able to generate up to 300/600/900W per TRG in each price band.

These turbines are freighted together in a DHL cardboard carton.

Each turbine has:

- No valves supplied, Four A200 male camlocks supplied only
- Warrantee reduced from 2 to 1 year
- Production lead time up to 4 weeks
- May not be available during production high season times

The twin pack also excludes:

- Cable
- Auto grease canister

Nota. Se presentan las especificaciones técnicas. Obtenido de Eco Innovation (2022) *Power Spout Thecnical Specifications*. (p.1). Eco Innovation.

