



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Maestría en Artes en Energía y Ambiente

**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**

**Ing. Alan Manolo López Gálvez**

Asesorado por el MSc. Ing. Víctor Manuel de León Contreras

Guatemala, septiembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**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**

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ING. ALAN MANOLO LÓPEZ GÁLVEZ**

ASESORADO POR EL MSC. ING. VÍCTOR MANUEL DE LEÓN CONTRERAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gomez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

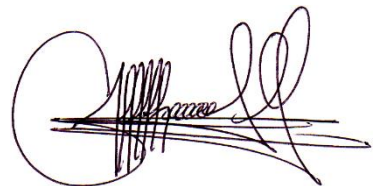
DECANO	Mtro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Dario Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
SECRETARIA	Mtra. Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **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:

**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**

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha octubre 2015.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large circular flourish on the left, followed by several vertical and horizontal strokes, and ending with a large, sweeping flourish on the right.

**Ing. Alan Manolo López Gálvez**

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por estar en cada uno de los instantes de mi vida, iluminando mí camino, a él sea el honor.
- Mis padres** José Ismael López y Nora Ninette Gálvez, por darme la vida, su apoyo y darme la mayor enseñanza, que es luchar por las personas que quiero, su amorosa compañía en las noches en vela, sus oraciones, su sabiduría, siendo un ejemplo durante toda mi vida.
- Mis hermanas** Nancy Marisol, Diana Ivón, Mercy Iliana López Gálvez, por su cariño y apoyo.
- Mis sobrinos** Jaslene, Dhylan y Sebastian Orozco López, por ser la alegría en mi vida.
- Mis abuelos** Enrique López, Margarita Franco, Carlos Gálvez (q. e. p. d.), Aura Juárez vda. de Gálvez, por su apoyo, cuidado y consejos.
- Mis amigos** Por haber compartido momentos de alegría, tristeza, adversidades y éxitos compartidos.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

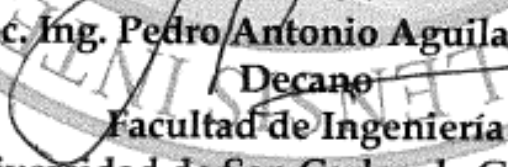
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por abrirme las puertas y darme el honor de formar parte de tan prestigiosa casa de estudios.
<b>Escuela de Estudios de Postgrado</b>	Por haberme enseñado y formado a lo largo de la carrera.
<b>Mi familia</b>	Por estar presentes en el transcurso y hasta culminar esta meta.
<b>MSc. Ing. Nicolás Guzmán</b>	Por el apoyo, consejos y recomendaciones brindadas al inicio de esta investigación.
<b>MSc. Ing. Víctor de León</b>	Por su asesoría y ayuda necesaria en el desarrollo de esta investigación.
<b>Empresa Municipal de Agua (Empagua)</b>	Por haber facilitado datos históricos de la producción de agua cruda, en la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy.

Ref.APT-2018-027

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 Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente titulado: "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" presentado por el Ingeniero en Mecánica Eléctrica Alan Manolo López Gálvez, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
MSc. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, septiembre de 2018.

Cc archivo/L.Z.L.A.

Ref.APT-2018-027

El Director 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 y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado "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" presentado por el Ingeniero en Mecánica Eléctrica Alan Manolo López Gálvez, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
M.A. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí  
Director

Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, septiembre de 2018.

Cc:archivo/LZ.L.A.



Ref.APT-2018-027

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado **"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"** presentado por el Ingeniero en Mecánica Eléctrica **Alan Manolo López Gálvez**.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

**Maestro Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque**  
**Coordinador(a) de Maestría**  
**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de San Carlos de Guatemala**



Guatemala, septiembre de 2018.

Cc:archivo/LZ.LA.

Ref.APT-2018-027

En mi calidad como Asesor del Ingeniero en Mecánica Eléctrica Alan Manolo López Gálvez doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado "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" quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

**Maestro. Ing. Víctor Manuel de León Contreras**  
**Asesor(a)**  
**Maestro en Formulación y Evaluación de Proyectos**

Guatemala, septiembre de 2018.

Cc: archivo/LZLA

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS.....	V
GLOSARIO.....	VII
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. GENERACIÓN DISTRIBUIDA RENOVABLE EN GUATEMALA.....	1
1.1. Definición.....	1
1.2. Recurso energético primario.....	1
1.2.1. Recursos renovables.....	2
1.2.2. Recursos no renovables.....	3
1.3. Mecanismo del marco regulatorio.....	3
1.3.1. Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía.....	5
1.4. Ventajas y desventajas para la distribuidora.....	7
1.4.1. Ventajas.....	8
1.4.2. Desventajas.....	9
1.5. Planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy.....	10

2.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO ECONÓMICO.....	13
2.1.	Potencial del recurso hidráulico de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy .....	13
2.1.1.	Análisis del caudal de producción histórico .....	13
2.1.2.	Estimación del potencial del recurso hidráulico.....	15
2.2.	Capacidad de generación de energía eléctrica .....	18
2.2.1.	Cálculo del potencial eléctrico .....	19
2.2.2.	Central hidroeléctrica .....	24
2.2.3.	Subestación eléctrica .....	28
	2.2.3.1. Sistema de protección y control .....	28
2.3.	Factibilidad económica de generación eléctrica con un generador distribuido renovable.....	30
2.3.1.	Análisis de beneficio.....	30
2.3.2.	Análisis de costo .....	30
2.3.3.	Relación beneficio – costo.....	33
3.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	37
3.1.	Presentación de resultados.....	37
3.2.	Discusión de resultados .....	38
	CONCLUSIONES.....	41
	RECOMENDACIONES .....	43
	BIBLIOGRAFÍA.....	45
	ANEXOS.....	51
1.	Mecanismo regulatorio de Guatemala.....	51
2.	Plano general de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy con la Central hidroeléctrica.....	57
3.	Esquema de procesos de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy con la Central hidroeléctrica .....	58

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Producción mensual de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy.....	14
2.	Hidrograma mensual de agua cruda de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy .....	16
3.	Error de ajuste mensual .....	17
4.	Hidrograma mensual proyectado con el método de series temporales .....	17
5.	Hidrograma proyectado con el método autoregresivo AR (2) .....	18
6.	Toma de agua del río Xayá, Finca la Sierra, departamento de Chimaltenango, Guatemala.....	19
7.	Planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, municipio de Mixco, departamento de Guatemala, Guatemala.....	20
8.	Curva de duración de caudales.....	22
9.	Carta de aplicación de turbinas hidráulicas.....	24

### TABLAS

I.	Categorización del sistema regulatorio de Guatemala, para un generador distribuido renovable (GDR).....	4
II.	Producción de agua cruda de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy .....	15
III.	Análisis de estadística descriptiva de caudales .....	22
IV.	Rango de aplicación de turbinas hidráulicas .....	26

V.	Especificaciones técnicas estimadas del equipo electromecánico recomendable para la central hidroeléctrica Lo de Coy .....	27
VI.	Costos de inversión de equipo electromecánico en US\$ de la central hidroeléctrica Lo de Coy.....	31
VII.	Costos de operación y mantenimiento anual en US\$ de la central hidroeléctrica Lo de Coy .....	32
VIII.	Cálculo de amortización financiamiento del proyecto en US\$ de la central hidroeléctrica Lo de Coy.....	34
IX.	Flujo neto de fondos del proyecto en US\$ de la central hidroeléctrica Lo de Coy .....	35

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
%	Número asociado a una razón representa una cantidad como una fracción en 100 partes.
>>	Mucho mayor que.
$m^3/s$	Metro cúbico por segundo.
<b>msnm</b>	Metros sobre el nivel del mar.
US\$	Dólar estados unidos, <i>Dollar United States</i> .
$\eta$	Eficiencia.





## GLOSARIO

<b>Agua potable</b>	Según la Comisión Guatemalteca de Normas COGUANOR NGO 29 001:99 es el agua apta para consumo humano con un límite máximo aceptable de UNT DE 5,0 y el límite máximo permisible de 15,0.
<b>Agua cruda</b>	Agua que ha de ser tratada antes de convertirse en agua potable.
<b>CNEE</b>	Comisión Nacional de Energía Eléctrica, es el ente regulador del mercado eléctrico en Guatemala.
<b>Costo hundido</b>	Es el costo que ya se ha incurrido independientemente si se realiza o no el proyecto, por lo tanto, no es relevante para tomar decisiones, por lo que estos se eliminan del análisis y valuación de un proyecto.
<b>Cota</b>	Altura en metros sobre el nivel del mar donde se ubican obras de un proyecto hidroeléctrico.
<b>Distribuidor</b>	Es la persona, individual o jurídica, titular o poseedora de instalaciones destinadas a distribuir comercialmente energía eléctrica.

<b>Energía eléctrica</b>	Forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, causada por el movimiento de cargas eléctricas en el interior de materiales conductores produciendo efectos luminosos, térmicos y magnéticos.
<b>Flujo de caja</b>	Acumulación neta de activos líquidos en un período determinado, indica la liquidez de una empresa.
<b>GDR</b>	Generador distribuido renovable, es la forma de generación de electricidad producida, a través de fuentes de recursos renovables cuya potencia neta es inferior o igual a 5 MW.
<b>Interruptor</b>	Dispositivo destinado al cierre y apertura de la continuidad de un circuito eléctrico bajo carga, en condiciones normales o bajo condiciones de corto circuito.
<b>LGE</b>	Ley general de electricidad, cuyo fin es normar el desarrollo de las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de electricidad.
<b>MEM</b>	Ministerio de Energía y Minas, es la institución rectora de los sectores energéticos y mineros de Guatemala.

<b>MVA</b>	Megavoltiamperio, siendo la dimensional que representa la potencia, equivalente de 1 voltio x 1 amperio x 10E+6.
<b>MW</b>	Megavatio es la relación directamente proporcional del MVA y el factor de potencia.
<b>NTGDR</b>	Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable, la cual establece las directrices que debe cumplir un distribuidor, generador distribuido renovable y usuario autoprodutor.
<b>Potencia eléctrica</b>	Relación del paso de energía de un flujo por unidad de tiempo, siendo la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un período de tiempo. La unidad de medida es el Vatio.
<b>RLGE</b>	Reglamento de la ley general de electricidad, el cual establece las directrices que se aplica dentro del marco de la LGE.
<b>Salto bruto</b>	Diferencia entre la cota mayor y la cota menor.
<b>Salto neto</b>	Diferencia entre salto útil y las pérdidas de cargas producidas a lo largo de todas las conducciones y accesorios.
<b>UNT</b>	Unidades nefelométricas de turbiedad, es una unidad utilizada para medir la turbidez de un fluido.



## RESUMEN

En este diseño de investigación de la estimación de la capacidad de generación de energía eléctrica como subproducto de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, pretende mostrar un recurso disponible que se encuentra sin uso, siendo posible aprovecharlo aplicando la tecnología adecuada para obtener un producto adicional. Este tipo de producción de energía eléctrica no representa daños al medio ambiente, puesto que contribuye a reducir la demanda de fuentes no renovables para este tipo de producción.

Se considera en la primera parte de esta investigación, el aspecto energético del marco regulatorio de Guatemala. En la segunda parte, se realiza el estudio técnico en donde se desarrolla el análisis estadístico de las variables cuantitativas de producción de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, con datos que fueron facilitados por la Dirección de Fuentes Superficiales autorizados por el subgerente técnico de la Empresa Municipal de Agua (Empagua), para determinar el potencial del recurso hidráulico. Asimismo, se realiza la estimación de capacidad de generación eléctrica, la descripción del equipo para maniobra y protección eléctrica conforme la conexión a la red de distribución.

En la tercera parte, se realiza el análisis e interpretación de los resultados, a fin de determinar la factibilidad económica, con un análisis de relación beneficio y costo. En donde se exceptúa el diseño y construcción de la central hidroeléctrica y subestación eléctrica, puesto que es un costo hundido y deberá

realizar por medio de licitación con empresas reconocidas en donde el beneficio y costo dependerá de la oferta que presenten.

La rentabilidad del proyecto surge por la comercialización de la energía eléctrica producida, recuperando la inversión de los costos más significativos, siendo los de la turbina Pelton de 2 inyectores y el generador eléctrico de 4 pares de polos, con una tasa interna de retorno de 1,72. Para posteriormente entregar utilidades directas, siendo un estimado anual de US\$ 2 324 283,91.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, entrega una producción diaria de 140 000 m<sup>3</sup>, la estación de bombeo Ojo de Agua 87 000 m<sup>3</sup>, el sistema la Brigada 40 000 m<sup>3</sup>, el sistema las Ilusiones y el Cambray 25 000 m<sup>3</sup> y el sistema Santa Luisa 10 000 m<sup>3</sup>. El cual no tiene un aprovechamiento óptimo, dado que se desperdicia un recurso vital para la generación de energía eléctrica, por no contar con una central hidroeléctrica. Se limita únicamente al abastecimiento de agua potable a la ciudad de Guatemala, para consumo humano.

La investigación se efectuó en la Universidad de San Carlos de Guatemala, bajo las directrices de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, considerando la Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía NTGDR. El estudio se desarrolló con datos facilitados por la Dirección de Fuentes Superficiales de la Empresa Municipal de Agua Empagua, de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy. Esta se encuentra ubicada en el km. 17,5 carretera Interamericana, municipio de Mixco, ciudad de Guatemala. Delimitando y destacando la energía eléctrica que se pierde, por no aprovechar la energía hidráulica, considerando el aspecto regulatorio, técnico y económico.

Para definir los objetivos de este documento fue necesario responder a la pregunta central del problema:

- ¿Cuánto potencial energético podría extraerse en la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, para la generación de energía eléctrica?

Para ayudar a responder detalladamente esta pregunta de manera delimitada y específica, se formularon las siguientes interrogantes auxiliares:

- ¿Cómo estimar el potencial hidráulico de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy?
- ¿Qué capacidad deberá tener el sistema de generación de energía eléctrica?
- ¿Será rentable la generación eléctrica por medio de un generador distribuido renovable?



## **OBJETIVOS**

### **General**

Estimar la capacidad de generación de energía eléctrica como subproducto de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy.

### **Específicos**

1. Analizar el caudal histórico y determinar el potencial del recurso hidráulico.
2. Estimar la capacidad de generación de energía eléctrica.
3. Interpretar y relacionar los resultados para determinar la factibilidad técnico - económica como un generador distribuido renovable.



## **RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO**

El propósito de la metodología adoptada fue alcanzar los objetivos programados, se diseñó en función de revisiones bibliográficas, investigaciones, así como consultas con profesionales en el campo de las hidroeléctricas. Las técnicas de análisis de información para desarrollar esta investigación, se establecieron por fases ordenadas, con la finalidad de realizar un correcto análisis y presentar una adecuada interpretación, estas se describen a continuación:

### **Fase 1: Métodos teóricos**

Las definiciones técnicas y el marco regulatorio se obtuvo mediante investigación bibliográfica, esta última fue categorizada de acuerdo a la pirámide de Kelsen donde establece que deberá realizarse en orden de predominio, de tal manera fue descrito el marco regulatorio de Guatemala, referente al tema en este documento.

### **Fase 2: Método cualitativo**

Se realizaron entrevistas a diversos profesionales en la materia, con la finalidad de aclarar interrogantes con base a la experiencia. Durante estas entrevistas fueron facilitados los datos de producción mensual de agua cruda del año 2000 al 2013, de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, que se utilizaron para completar la siguiente fase.

### **Fase 3: Método cuantitativo**

Con los datos recopilados, se determinó el caudal mínimo, máximo y medio de la producción de agua cruda del año 2000 al 2013. Datos reales que se interpretaron con el método de series temporales y método autoregresivo AR (2) de Thomas–Fiering, para realizar una estimación del caudal del año 2014 al año 2028. Con el primer método se identificó que los datos proyectados presentaron un comportamiento que no se ajusta a los datos reales. Con el segundo método, se aplicó una serie sintética con una variable aleatoria normal distribuida del periodo estimado presentó un ajuste más apegado al comportamiento de los datos reales.

Con los resultados de ambos métodos, se aplicó estadística descriptiva y se elaboró la curva de duración de caudales, para determinar el caudal de diseño; adicionalmente, se identificó el salto neto. Relacionando estos datos, se determinó la capacidad de la máquina hidráulica y eléctrica, analizando e interpretando estos resultados, se determinó la factibilidad económica como un generador distribuido renovable.

## INTRODUCCIÓN

En su mayoría, los productos generan algún subproducto, regularmente el subproducto no es de interés, porque ya se alcanzó satisfacer una necesidad. Entonces se descarta en su totalidad sin permitirle un segundo uso o aplicación, de esta manera, alcanzar un beneficio adicional.

La dependencia del petróleo en los medios de producción es porque se sabe aprovechar todos los beneficios que se pueden extraer del mismo. Cada uno de los subproductos se obtienen mediante otro proceso, por ello es necesario analizar cada uno de ellos y generar ideas innovadoras, que puedan dar existencia a un beneficio adicional.

Por tal razón, se logró identificar el potencial que posee la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, ubicada en el municipio de Mixco, ciudad de Guatemala. Su producto principal es velar por el abastecimiento de agua potable a los vecinos de distintas zonas de la capital; sin embargo, existe un subproducto que se desperdicia ostentadamente por la razón que ya se cubrió la necesidad básica, limitando en sí el potencial adicional que poseen las plantas de tratamiento en Guatemala. En Perú, la empresa pública metropolitana de agua potable y saneamiento EPMAPS, a través de la generación de hidroelectricidad, mediante las plantas de tratamiento de agua potable genera en la central llamada Recuperadora 14,7 MW y en la central El Carmen un total de 8,3 MW permitiendo un ahorro anual de US\$ 1 750 000,00. (Ubidia A., 2015)

Este documento presenta una solución para aprovechar este recurso hidráulico que se desperdicia, valiéndose de la infraestructura ya establecida actualmente en la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy. En su interior cuenta con la conducción y circulación de agua cruda que será tratada para su aprovechamiento.

En el canal de entrada, el líquido ingresa con cierto caudal que podría ser utilizado para mover los álabes de una turbina, movimiento mecánico que se podría transmitir al eje de un generador eléctrico y como resultante generar energía eléctrica. Lo que conlleva al uso de los recursos de una manera más responsable y eficiente, para mejorar la calidad de vida para todos, sin provocar daños al ecosistema.

# **1. GENERACIÓN DISTRIBUIDA RENOVABLE EN GUATEMALA**

## **1.1. Definición**

La Generación Distribuida Renovable (GDR) es la forma en que el ente regulador del sector eléctrico en Guatemala, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) permite la operación de centrales generadoras de electricidad en el mercado mayorista, a través del ente operador del sistema eléctrico y mercado eléctrico de Guatemala, el Administrador del Mercado Mayorista (AMM). Estas unidades generadoras son interconectadas a las redes de distribución en donde su participación de potencia neta no deberá superar los cinco megavatios 5 MW aplicando tecnologías que hagan uso de los recursos renovables. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014)

## **1.2. Recurso energético primario**

Guatemala es un país que posee diversidad de recursos en una cantidad inmensurable; además alberga un valioso patrimonio natural y cultural. Su ubicación geográfica es ventajosa en el ámbito comercial y ambiental que le permite tener lo necesario, para originar un desarrollo integral del país. (Beljansky, 2012)

El recurso energético primario es el que se encuentra en la naturaleza en diferentes tipos de energía, estos tienen la versatilidad de convertirse en energía eléctrica, mediante el uso de tecnologías innovadoras. (Beljansky, 2012)

Estos tipos de recursos de energía primaria se clasifican en:

- Recursos renovables
- Recursos no renovables

(Beljansky, 2012)

### **1.2.1. Recursos renovables**

Son todos aquellos recursos que aportan una fuente de energía que tienen un proceso natural para renovarse. También son intervenidos por acciones humanas con el uso de tecnologías que permitan alcanzar el proceso sin ser afectado dicho recurso natural renovable. (Beljansky, 2012)

En su mayoría, las principales fuentes de energía surgen por la participación natural del sol, es decir, la energía solar da vida en general a todas estas fuentes de energía. Por ello, al hacer uso de estos recursos naturales disminuye el deterioro al medio ambiente, contribuye notablemente en la reducción del cambio climático. (Beljansky, 2012)

En Guatemala, según información del Ministerio de Energía y Minas (MEM), se consideran los siguientes recursos renovables para la producción de energía renovable:

- Hidroelectricidad
- Geotérmico
- Eólico
- Solar
- Biomásica

(Ministerio de Energía y Minas República de Guatemala, s.f.)



### **1.2.2. Recursos no renovables**

Son los recursos que aportan una fuente de energía que no posee un proceso natural para renovarse, producirse o regenerarse. Regularmente su existencia es limitada en cantidades fijas, y su consumo es superior a la capacidad de la naturaleza en recrearlos. (Beljansky, 2012)

Estos se obtienen al ser extraídos de reservas que pueden hallarse en pequeñas o grandes cantidades. Su precio varía y depende del tamaño del yacimiento, localización y del tipo de explotación. Este tipo de recurso es limitado y se puede agotar. Además, su uso produce gases que contribuyen a la contaminación del medio ambiente y generan gases tóxicos. (Beljansky, 2012)

Entre los recursos no renovables se pueden mencionar los siguientes:

- Petróleo
- Minerales
- Metales
- Gas natural

(Beljansky, 2012)

### **1.3. Mecanismo del marco regulatorio**

En Guatemala se ha mostrado interés por el desarrollo sostenible del país, por ello, a continuación se presenta el aspecto legal, específicamente los términos regulatorios para un GDR, categorizado de acuerdo a la pirámide de Kelsen, establecido en orden de predominio. Ver Anexo. (Ministerio de Energía y Minas República de Guatemala, s.f.)

Tabla I. **Categorización del sistema regulatorio de Guatemala, para un generador distribuido renovable (GDR)**

Regulación de Guatemala	Artículo
Constitución Política de la República de Guatemala, 1985.	97, 119, 128 y 129.
Ley General de Electricidad, 1996.	8 y 10.
Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable, 2003.	5.
Reglamento de la Ley General de Electricidad, 1997.	14 y 16 bis.
Reglamento de la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable, 2005.	1 y 17.

Fuente: elaboración propia.

Las plantas GDR que sean inscritas como tal, deberán adoptar obligatoriamente los requerimientos planteados por la Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía NTGDR. Asimismo, el término anterior no debe confundirse con el de Generador Distribuido Renovable, que es la persona individual, representante legal o dueño de una central de generación de energía eléctrica por medio de recursos renovables y sea partícipe en la actividad de GDR, siendo calificados como Participantes del Mercado Mayorista. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014)

### **1.3.1. Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía**

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) emite la Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía NTGDR, en la Resolución CNEE-227-2014. Dicha norma es de aplicación obligatoria y tiene como objetivo plantear los requerimientos que deberán cumplir los distribuidores y los generadores distribuidos renovables para la conexión, operación, control y comercialización de energía eléctrica producida con fuentes renovables. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014)

En el Artículo 5 de la NTGDR se establecen las obligaciones del distribuidor al que se conecte el GDR, este consiste en remitir la copia de la solicitud del interesado a la CNEE, determinar la capacidad del punto de conexión o ampliaciones y modificaciones en el sistema de distribución incluyendo el costo, brindar información técnica que solicite la CNEE o el interesado para desarrollar el proyecto de generación, diseño y evaluación de conexión. También permitir la conexión de los GDR al sistema de distribución y si requiere modificaciones o ampliaciones en las instalaciones de distribución correrán por cuenta del GDR, cumplir con lo que establezca la CNEE para la adecuada conexión y operación de las instalaciones del GDR, cumplir con la normativa para la correcta y segura conexión y operación de los GDR a su sistema de distribución, instalar los sistemas de protección y de desconexión para la protección de sus instalaciones y las de los GDR como para las de terceros. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014)

Además dar mantenimiento preventivo y correctivo a sus instalaciones, para que el GDR pueda inyectar energía a su sistema, tener un control y

registro, así como coordinar la operación de los Generadores Distribuidos Renovables. Brindar asistencia para atender a los interesados en conectar proyectos de GDR a su sistema de distribución, elaborar y someter a consideración de la CNEE, entregar la información que la CNEE requiera en relación a la LGE y el RLGE incluyendo la NTGDR, verificar el punto de conexión propuesto en el dictamen de capacidad de conexión. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014)

En el siguiente Artículo corresponde a las obligaciones del interesado en participar como Generador Distribuido Renovable, siendo el Artículo 6. Estas radican en presentar al distribuidor la solicitud de dictamen de capacidad y conexión usando el formulario registrado, brindar al distribuidor o la CNEE información técnica de sus instalaciones o relacionada al proyecto, construir y cubrir los costos de la línea y equipamiento o instalaciones necesarios para llegar al punto de conexión. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014)

También cumplir con las condiciones que la CNEE implante en la resolución de autorizaciones para la conexión y operación de sus instalaciones, cubrir los costos de las modificaciones o ampliaciones de las instalaciones del distribuidor adyacentes al punto de conexión y que la CNEE determine, instalar sistemas de protección y desconexión para la seguridad de las personas y las instalaciones, tanto de la distribuidora como del GDR y otros usuarios. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014)

Entregar información que la CNEE necesite en forma y tiempo que esta disponga en relación en la LGE y el RLGE incluyendo esta norma, registrar en la Dirección General de Energía del MEM las cotas como central generadora menor o igual a 5 MW. Debiendo realizar esta acción el interesado previo a presentar su solicitud de dictamen de capacidad y conexión al distribuidor para

que no exista conflicto con otros proyectos en el mismo río. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014)

Cuando el GDR opte por participar en la venta de potencia, solicita la asignación de oferta firme y oferta firme eficiente deberá habilitarse en el Mercado Mayorista como integrante y cumplir con las normas de coordinación comercial y normas de coordinación operativa, incluir todos los documentos requeridos por esta norma en la solicitud de dictamen de capacidad y conexión. La información del proyecto presentada en la solicitud de dictamen de capacidad y conexión sea idéntica a la que se presente en las diferentes entidades que intervienen en el proceso de autorización, realizar la solicitud de dictamen de capacidad y conexión antes del inicio de construcción del proyecto. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014)

Para complementar lo anteriormente mencionado, se exhorta la lectura de la Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoproductores con Excedentes de Energía NTGDR, este último no se menciona por no estar dentro del enfoque de este trabajo de graduación. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014)

#### **1.4. Ventajas y desventajas para la distribuidora**

Según la Norma técnica de generación distribuida renovable NTGDR, la distribuidora tiene la obligación de permitir la conexión de los GDR´s a la red de distribución, siendo propietaria la distribuidora. Esta se enfrentará a una serie de discrepancias que es necesario dilucidar con estudios de flujo de carga que la misma distribuidora se encarga de realizar para eliminar, de manera teórica, las posibles inconformidades o problemas que dicha conexión del GDR conlleve a su red de distribución. Esto con el afán de garantizar la continuidad y la

calidad del servicio de todos los usuarios de la red de distribución. Por ello, es necesario mencionar las ventajas y desventajas que inherentemente presentan las conexiones de un GDR a la red de distribución. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014)

#### **1.4.1. Ventajas**

La conexión de un GDR provee considerables beneficios a la distribuidora. Además de contribuir a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono producido por la generación de energía con combustibles fósiles, mejor imagen ante el público y el mundo, es decir, crea un impacto positivo incluso en la sociedad. (Mohr, 2007)

Es posible que para llegar a estos beneficios, antes sea necesario intervenir en dónde será responsabilidad del distribuidor presentar el dictamen de capacidad y de conexión. Así como las ampliaciones y modificaciones necesarias para no aumentar las pérdidas técnicas de distribución, estando correctamente justificadas y autorizadas por la CNEE. A continuación se describen algunas de las ventajas que adquiere la distribuidora en la red de distribución, al conectar un GDR:

- Posterga una prevista inversión en líneas de transmisión, cuando las subestaciones de transmisión se encuentran muy alejadas y los flujos de energía disminuyen, estos mejoran al instalar un GDR.
- Incremento de seguridad en el suministro eléctrico, según la capacidad de generación y ubicación geográfica de la unidad generadora.

- Aumenta la calidad del suministro eléctrico, regula el voltaje y proporciona un control sobre la energía reactiva en la línea de distribución.
- Tiene la capacidad de disminuir las pérdidas que se generan a lo largo de una línea de distribución, incluso mejora el nivel de tensión.
- Incrementa la competencia en la matriz energética y favorece a los precios de la tarifa del suministro de energía para el usuario.
- Reducción de emisiones de dióxido de carbono producido por la generación de energía con combustibles fósiles.

(Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014)

#### **1.4.2. Desventajas**

La conexión de un GDR a la red del sistema de distribución en algunos casos, también presenta implícitamente algunas desventajas. Entre las cuales se mencionan las siguientes:

- En el marco regulatorio de Guatemala, no hay evidencia de un incentivo para la empresa distribuidora al permitir la conexión de un GDR. Esto a no ser más que el costo del peaje por el uso de las líneas de distribución o el interés de negociación que presente la distribuidora por la energía que tendría a su disposición, si el GDR no la vende directamente al mercado eléctrico nacional o regional.
- Efecto en los voltajes en la red de distribución como resultado de la conexión del GDR por la reacción del inducido, siendo esta la distorsión

del campo magnético del entrehierro por la corriente eléctrica que fluye en el estator, debido a las marcaciones del gobernador que influyen en la frecuencia y la tensión en los bornes cuando ingresa o sale una carga.

- Incerteza en la calidad o eficiencia de la tecnología del GDR que se conectará a la red de distribución, pudiendo ser la causa de interrupciones o desconexiones del sistema de la red de distribución.

(Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014)

### **1.5. Planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy**

La planta de tratamiento está constituida de un canal de entrada, tres floculadores, cuatro sedimentadores y seis filtros, esta es abastecida por medio del acueducto Xayá Pixcayá que está formado por la presa de derivación La Sierra, la presa de derivación El Tesoro y los túneles para líneas de conducción que concluyen en la caja de entrada de la planta de tratamiento.

(Municipalidad de Guatemala, 2015)

La infraestructura de la planta de tratamiento permite completar el proceso de producción de agua potable con una mínima cantidad de energía eléctrica que se utiliza únicamente para aplicar la dosis respectiva de químicos.

(Municipalidad de Guatemala, 2015)

- Caja de entrada: componente de la planta de tratamiento que establece la conexión con el acueducto Xayá Pixcayá, este elemento tiene la capacidad de regular el caudal de agua cruda que se desea tratar, atrapando los desechos sólidos grandes, rebalsando el exceso del líquido hacia el desfogue de agua cruda.



- Canal de entrada: posee la función de realizar la medición del caudal de agua cruda que ingresa a la planta para su tratamiento, haciendo uso de un medidor de caudal tipo Parshall; posterior a la medición en el mismo canal, se realiza la precloración, cuyo proceso consiste en la aplicación de cloro al agua antes de cualquier otro tratamiento para contribuir en el proceso de coagulación y reducción de materia en suspensión causante de sabor y olor por oxidación, para retardar su descomposición en los sedimentadores.
- Canal de mezcla rápida: en este canal se realiza la aplicación de los químicos, a través del cuarto de máquinas, en el que se realizan cuatro tipos de dosificaciones siendo: sulfato de aluminio, polielectrólito, cal hidratada y sulfato de cobre.
- Canal de mezcla lenta: en este canal se efectúa la floculación formando pantallas que desvían el agua en forma serpenteada, con la finalidad de disminuir la velocidad del caudal, y como reacción del sulfato de aluminio se unen pequeñas partículas de lodo hasta alcanzar un tamaño considerablemente mayor, provocando que por su propio peso se deposite al fondo de los tanques sedimentadores.
- Tanques sedimentadores: posterior a los floculadores se ubica el canal que distribuye el agua hacia cuatro tanques sedimentadores de tipo convencional que se alimenta, a través de los agujeros que poseen las paredes, de esta forma se logra disminuir la velocidad y compensar el agua que ingresa al tanque, en la salida de cada tanque sedimentador se recolecta el flujo ascendente de agua por un canal en la superficie interconectado con los filtros por medio de tuberías.

- Filtros: estos tienen la finalidad de remover toda la materia en suspensión que por sus características físicas no permitió su aglomeración para ser depositada al fondo del tanque sedimentador, este tipo de filtro es conocido como filtro rápido a presión conformado por un lecho de grava, piedrín y arena antracita.
- Tanque de almacenamiento: hasta donde es conducida el agua filtrada por un canal totalmente cerrado, canal donde se aplica la cloración final, agua que completa su tratamiento para ser dirigida a otros tanques de distribución ubicados en distintos puntos de la ciudad, se dispone de un tanque de almacenamiento de hasta veinticinco mil metros cúbicos.

(Municipalidad de Guatemala, 2015)

Al finalizar el recorrido por el canal cerrado, el agua tratada posee una turbiedad que oscila entre 1,0 a 2,5 unidades nefelométricas de turbiedad UNT, estando mucho antes del límite máximo aceptable de 5,0 UNT y el límite máximo permisible 15,0 UNT. (COGUANOR - Comisión Guatemalteca de Normas, 1999)

## **2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO ECONÓMICO**

Para cumplir con los objetivos de esta investigación, se utilizaron métodos teóricos, estadísticos y análisis numérico de ecuaciones de naturaleza bibliográfica. Con los que se predijo el comportamiento a futuro del potencial del recurso hidráulico y la capacidad de generación de energía eléctrica, en la planta de tratamiento de agua potable. (Municipalidad de Guatemala, 2015)

Con dichos resultados, se determinó la factibilidad económica. Sin considerar la adquisición del terreno y obra civil para la construcción de la central hidroeléctrica, ya que la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, se encuentra ubicada en un lugar específico, estando compuesta con la mayor parte de las instalaciones para considerar una pequeña central hidroeléctrica. (Municipalidad de Guatemala, 2015)

### **2.1. Potencial del recurso hidráulico de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy**

Para determinar este potencial fue necesario realizar el análisis del caudal de producción histórico del año 2000 al año 2013, para estimar el comportamiento de la producción de agua del año 2014 al año 2028 de la planta de tratamiento. (Municipalidad de Guatemala, 2015)

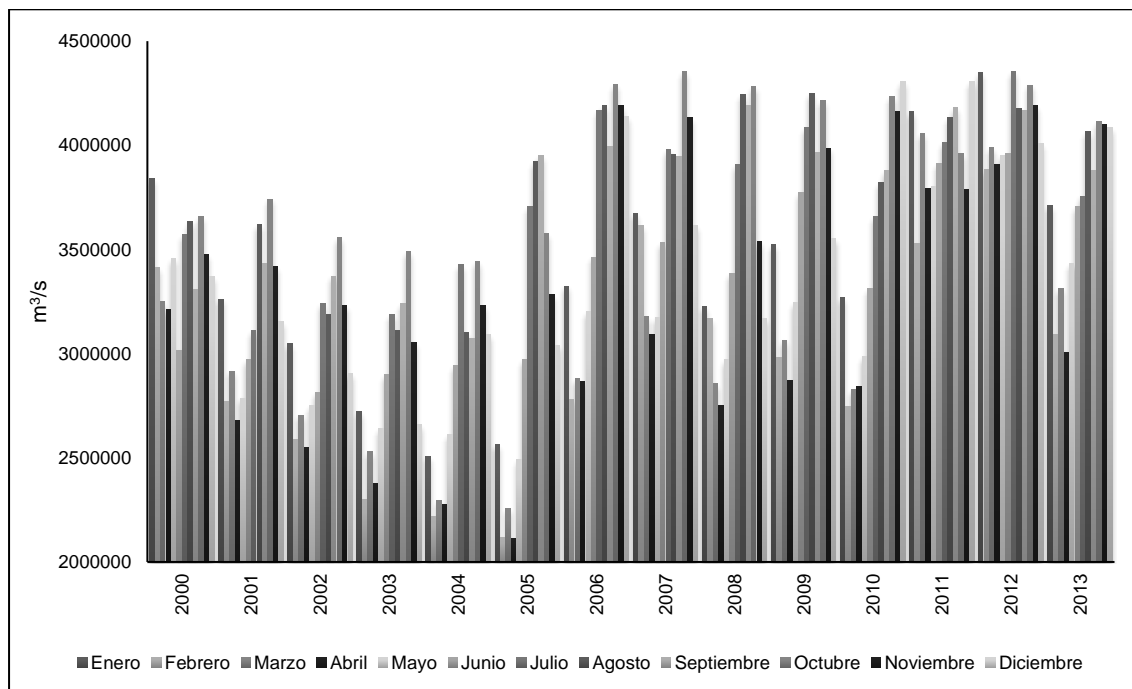
#### **2.1.1. Análisis del caudal de producción histórico**

Para realizar el análisis de caudal de producción, fue necesario comprender que en mecánica de fluidos se define al caudal como la unidad de

volumen del fluido que avanza por una unidad de tiempo, llamado caudal volumétrico o índice de fluido. (Saldarriaga, 2008)

En la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, se realiza la medición del caudal en una sección del canal abierto, donde existe la construcción de un medidor Parshall o también llamado canal Parshall, ya que poseen distintas ventajas; entre ellas se puede mencionar que es un medidor muy confiable puesto que no requiere la toma de varias mediciones para obtener un dato correcto, la conducción del agua es libre y no se interrumpe por elementos arrastrados por la corriente, el tipo de construcción evita la sedimentación de materiales que afecten su funcionamiento. (Lux, 2010)

Figura 1. **Producción mensual de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy**



Fuente: Municipalidad de Guatemala, 2015.

Según los datos históricos proporcionados por el subdirector de Fuentes Superficiales de la Empresa Municipal de Agua Empagua, se elaboró la siguiente tabla del año 2000 al año 2013. (Municipalidad de Guatemala, 2015)

Tabla II. **Producción de agua cruda de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy**

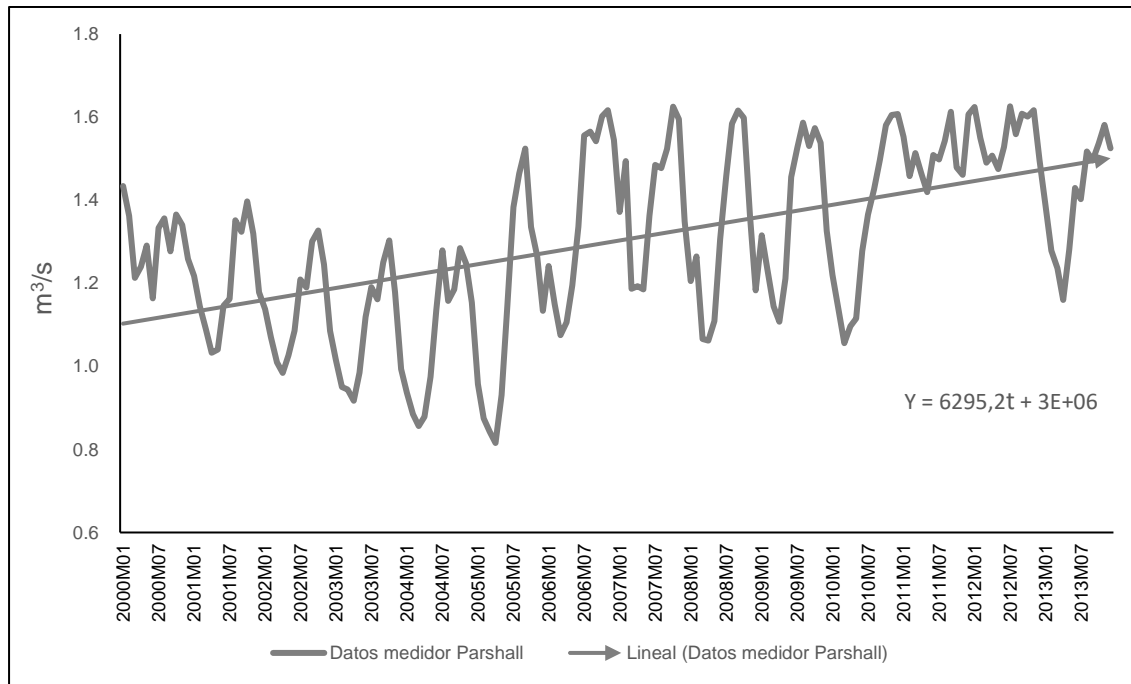
Año	m <sup>3</sup>			
	Total	Máxima	Mínima	Promedio
2000	41 209 993,00	3 840 591,00	3 016 990,00	3 434 166,08
2001	37 864 356,00	3 742 208,00	2 677 489,00	3 155 363,00
2002	35 945 591,00	3 555 176,00	2 551 284,00	2 995 465,92
2003	34 212 495,60	3 491 114,40	2 298 297,60	2 851 041,30
2004	34 217 520,91	3 441 837,31	2 216 941,20	2 851 460,08
2005	35 987 978,80	3 950 449,20	2 113 815,60	2 998 998,23
2006	43 490 013,60	4 291 336,80	2 780 792,40	3 624 167,80
2007	44 250 966,00	4 352 551,20	3 093 199,20	3 687 580,50
2008	41 686 906,80	4 281 508,80	2 753 060,40	3 473 908,90
2009	43 514 000,40	4 249 771,20	2 871 000,00	3 626 166,70
2010	42 041 538,00	4 306 024,80	2 747 354,40	3 503 461,50
2011	47 626 659,20	4 304 523,60	3 527 524,80	3 968 888,27
2012	49 232 412,00	4 355 262,00	3 883 521,60	4 102 701,00
2013	44 256 027,60	4 116 448,80	3 007 386,00	3 688 002,30

Fuente: Municipalidad de Guatemala, 2015

### 2.1.2. Estimación del potencial del recurso hidráulico

Los datos adquiridos por el medidor Parshall son cronológicos, los cuales se muestran en la siguiente figura, datos que se interpretarán con el método de series temporales y método autoregresivo AR (2) de Thomas–Fiering, para simular el caudal del año 2014 al 2028. (Monsalve Sáenz, 1999)

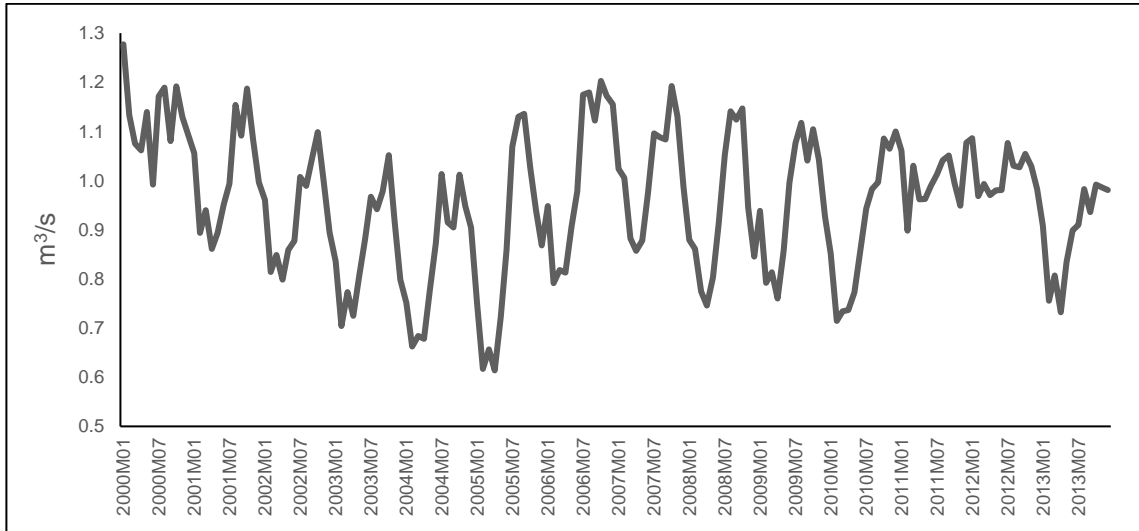
Figura 2. **Hidrograma mensual de agua cruda de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy**



Fuente: elaboración propia.

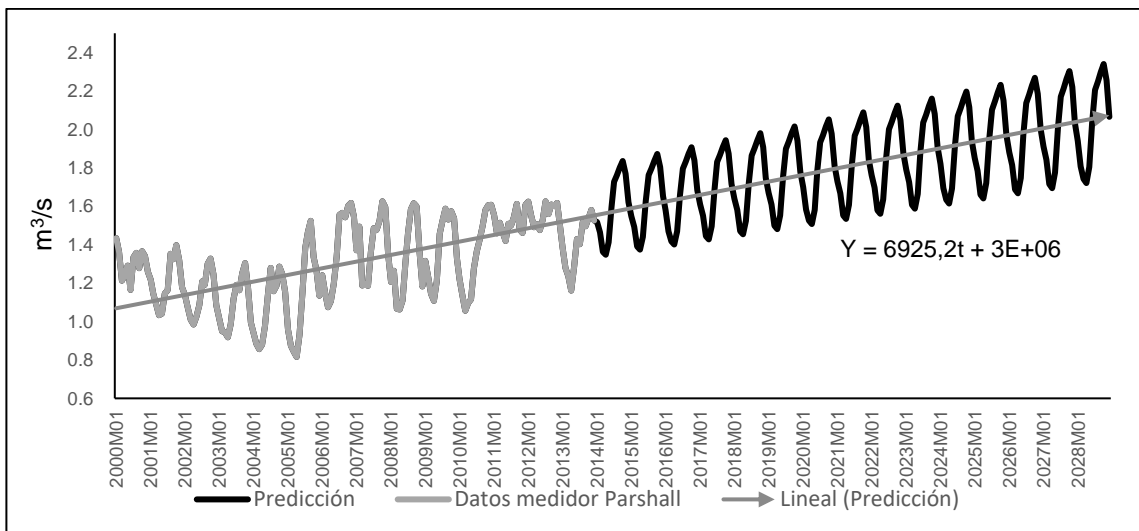
El modelo adecuado para el análisis de la serie cronológica es el modelo multiplicativo, lo que significa que se multiplicará la tendencia y el índice de estacionalidad, para obtener la predicción, según el análisis de series de tiempo mediante un gráfico de líneas el cual se consolida con los datos obtenidos con el medidor Parshall. Y el método seleccionado para realizar el análisis de tendencia y de serie cronológica fue el método lineal, ya que el método exponencial, el método polinómico y potencial presenta un crecimiento intemperante y no se ajusta al comportamiento histórico de la producción mensual de agua cruda, siendo el método lineal que posee un menor error de ajuste mensual siendo de  $\pm 0,025 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $\pm 2,5 \%$ ). (Peña, 2010)

Figura 3. Error de ajuste mensual



Fuente: elaboración propia.

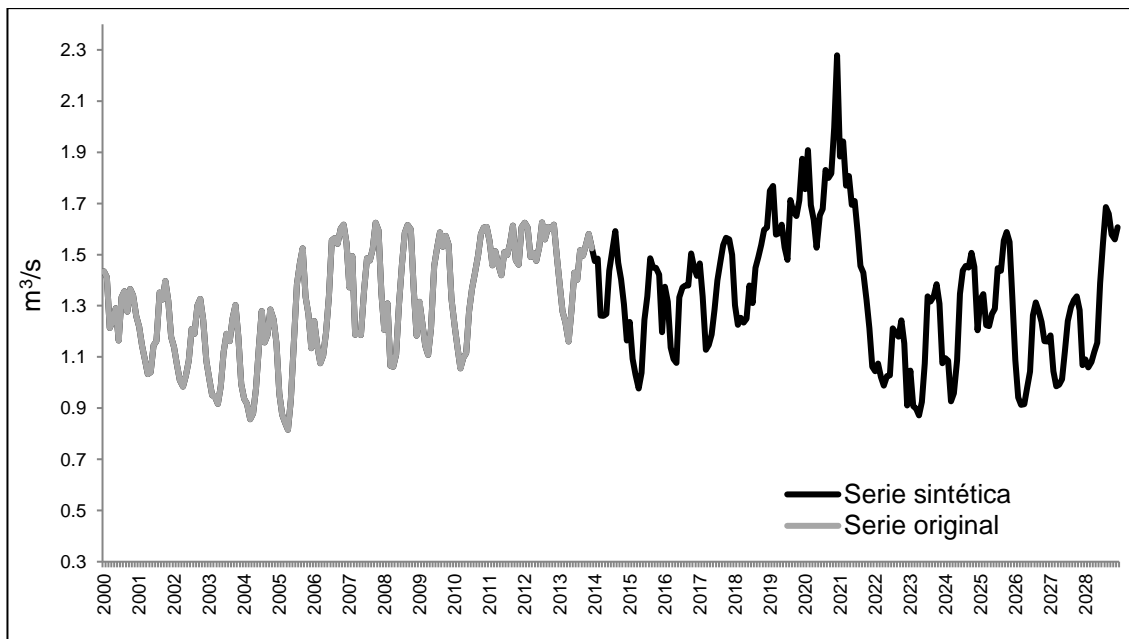
Figura 4. Hidrograma mensual proyectado con el método de series temporales



Fuente: elaboración propia.

Con el método autoregresivo AR (2) de Thomas–Fiering, se generó una serie sintética para un período de 15 años de caudales medios mensuales, con una variable aleatoria normal distribuida con media igual a cero y desviación estándar igual a uno, con doce variables correspondientes a los meses de los quince años, obteniendo el siguiente hidrograma que posee un mejor ajuste en comparación al modelo anterior. (Monsalve Sáenz, 1999)

Figura 5. **Hidrograma proyectado con el método autoregresivo AR (2)**



Fuente: elaboración propia.

## 2.2. Capacidad de generación de energía eléctrica

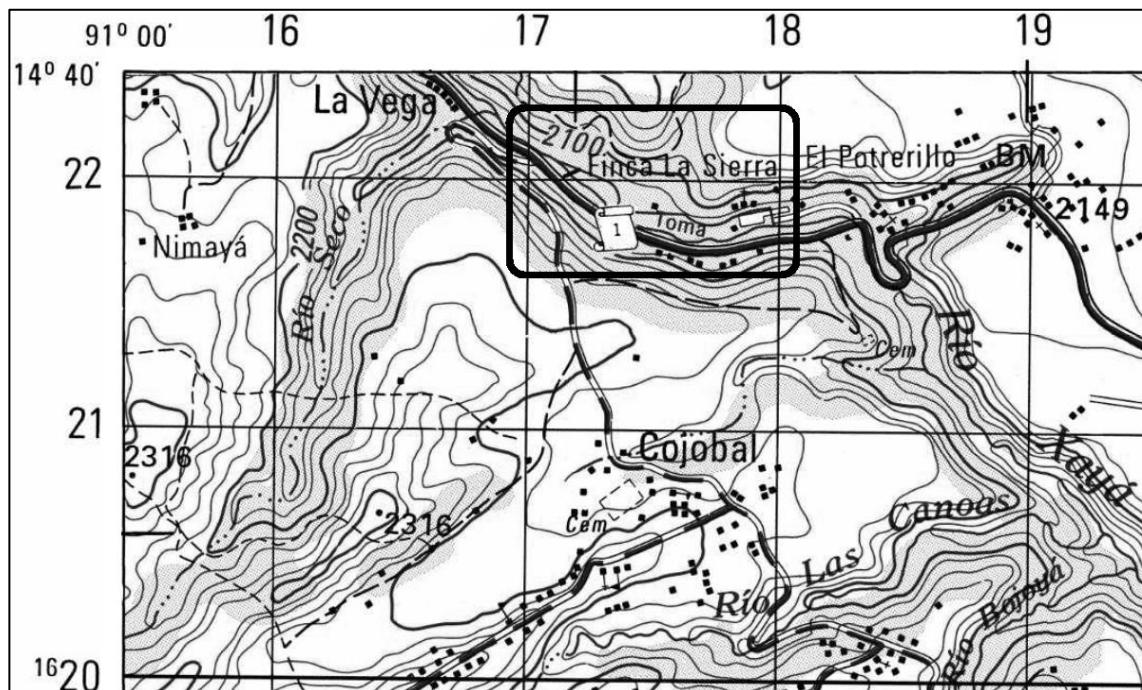
Para estimar la capacidad de generación de energía eléctrica como subproducto de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, se hará uso de los datos obtenidos producto del análisis realizado anteriormente en este capítulo. (Municipalidad de Guatemala, 2015)



### 2.2.1. Cálculo del potencial eléctrico

Es importante establecer ciertos parámetros necesarios, como la altura inicial y la altura final, para definir el salto neto del agua, no se realizará el cálculo del caudal, puesto que este dato está registrado a través de las mediciones obtenidas por el canal Parshall instalado estratégicamente en la entrada de la planta de tratamiento Lo de Coy. (Municipalidad de Guatemala, 2015)

Figura 6. Toma de agua del río Xayá, Finca la Sierra, departamento de Chimaltenango, Guatemala.

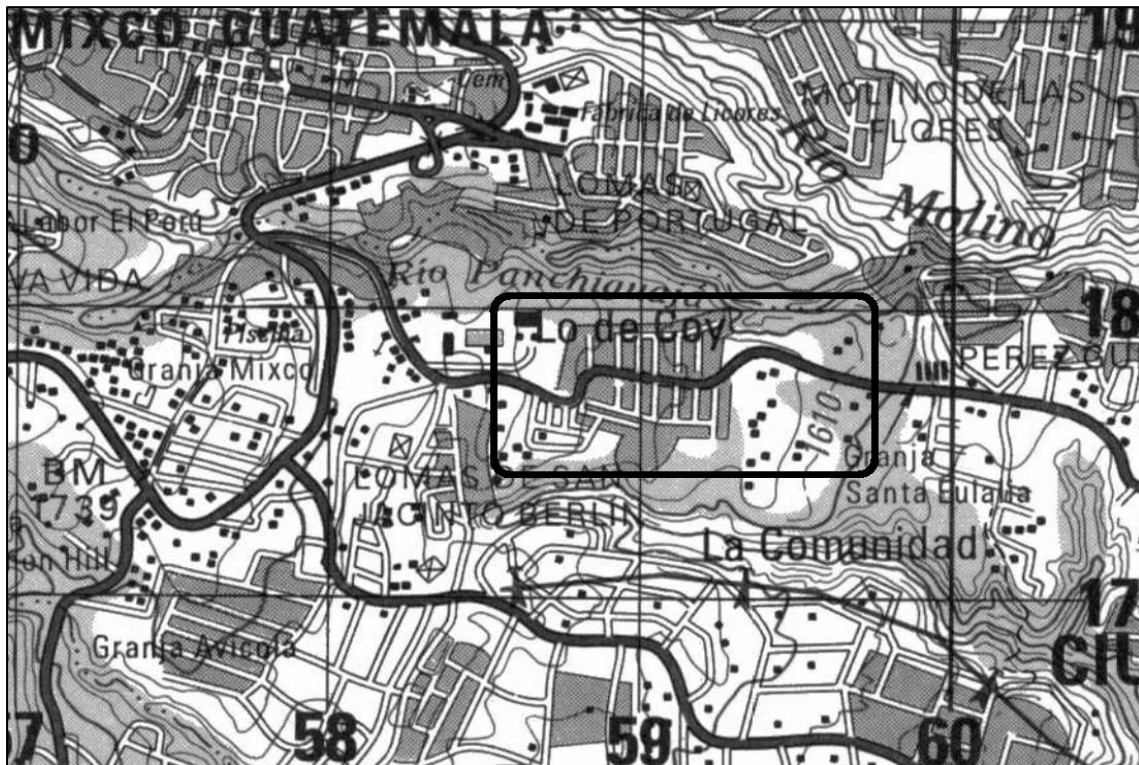


Fuente: University of Texas at Austin Libraries, 2006.

La superficie alta es la cota de la toma de agua del río Xayá en metros sobre el nivel del mar está localizada en el departamento de Chimaltenango,

Guatemala, siendo esta la altura inicial la cual se ubicó por medio del mapa topográfico digital de Chimaltenango, publicado en el portal electrónico de la Universidad de Texas en Austin, en la librería de topografía, encontrando la curva de nivel con una elevación de 2 100 msnm. (University of Texas at Austin Libraries, 2006).

Figura 7. **Planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, municipio de Mixco, departamento de Guatemala, Guatemala**



Fuente: University of Texas at Austin Libraries, 2006.

La superficie baja es la cota en metros sobre el nivel del mar, donde se descarga el agua cruda en el canal Parshall, instalado en la entrada de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, donde se inicia el proceso de

potabilización del agua cruda, medidor localizado por medio del mapa topográfico digital de la ciudad de Guatemala, siendo esta la altura final, ubicada sobre la curva de nivel que posee una elevación de 1 610 msnm. (University of Texas at Austin Libraries, 2006)

Para determinar la altura bruta será necesario considerar la siguiente ecuación:

$$H_b = H_s - H_i$$
$$H_b = 2\,100\,m - 1\,610\,m = 490\,metros$$

Donde  $H_b$  es la altura bruta en metros sin pérdidas en la tubería,  $H_s$  es la cota superior y  $H_i$  la cota inferior. Se estimará el 10 % de la altura bruta como pérdidas en la tubería, siendo esta de 49 metros. Con la siguiente ecuación se determinará el salto neto, siendo la diferencia de la altura bruta y las pérdidas totales en la tubería de conducción.

$$H_N = H_{bruta} - H_{pérdidas}$$
$$H_N = 490\,m - 49\,m = 441\,metros$$

(Carta, Calero, Colmenar, & Castro, 2009)

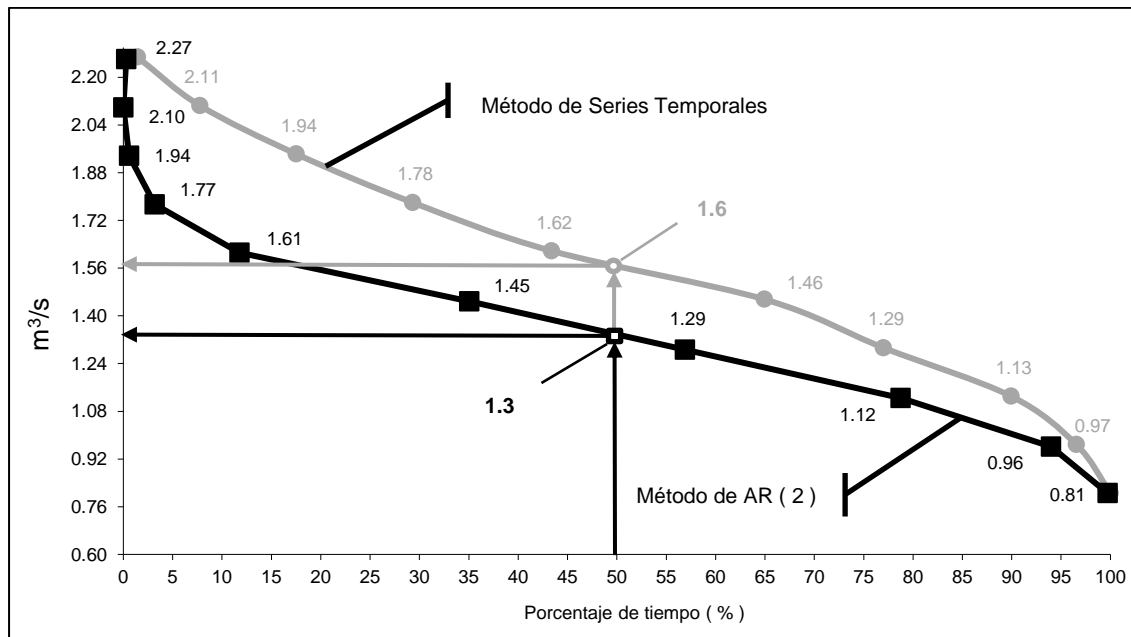
Finalmente, se procedió con el análisis de estadística descriptiva de los datos proyectados, mediante el método de series temporales y método autoregresivo AR (2) calculado anteriormente en este capítulo, para establecer el caudal en metros cúbicos por segundo, se elaboró la curva de duración de caudales considerando para este proyecto, el caudal de diseño al 50 % de tiempo del método que tenga mejor ajuste. (Villón Béjar, 2004)

Tabla III. **Análisis de estadística descriptiva de caudales**

<i>Método de series temporales</i>		<i>Método de AR (2)</i>	
Media	1,6	Media	1,3
Error típico	1,84 %	Error típico	1,28 %
Mediana	1,6	Mediana	1,3
Moda	1,1	Moda	1,1
Desviación estándar	0,3	Desviación estándar	0,2
Varianza de la muestra	0,1	Varianza de la muestra	0,1
Curtosis	-0,7	Curtosis	(0,0)
Coefficiente de asimetría	0,1	Coefficiente de asimetría	0,3
Rango	1,5	Rango	1,5
Mínimo	0,8	Mínimo	0,8
Máximo	2,3	Máximo	2,3
Cuenta	348,0	Cuenta	348,0
Nivel de confianza (95,0 %)	4 %	Nivel de confianza (95,0 %)	3 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Curva de duración de caudales**



Fuente: elaboración propia.

Con el análisis estadístico y la curva de duración de caudales, se interpretó que los dos métodos utilizados son funcionales, pero el método autoregresivo AR (2) es el que mejor se ajusta a los registros históricos reales, del cual se obtiene un menor error típico de 1,28 % con una desviación estándar de 0,2 con un caudal medio de diseño proyectado de 1,3 m<sup>3</sup>/s, siendo el que se utilizó para determinar el potencial eléctrico.

Para determinar el potencial eléctrico por la central, se hará uso de la siguiente ecuación:

$$P = 9\,810 * Q * H_N * \eta_{\text{Turbina}} * \eta_{\text{Generador}} * \eta_{\text{Mecánica}}$$

Donde P es la energía teórica simulada con los datos formulados en vatios, Q el caudal en metros cúbicos por segundo, H<sub>N</sub> es el salto neto, η<sub>T</sub> se refiere a la eficiencia de la turbina entre 75 a 94 %, η<sub>G</sub> se refiere a la eficiencia del generador entre 92 a 97 % y η<sub>M</sub> se refiere a la eficiencia mecánica del eje de la turbina y del generador sin acople entre 95 y 97 %, con ejes acoplados 100 %, en este caso serán considerados como ejes acoplados. Resolviendo la ecuación anterior, se logra lo siguiente:

$$P = 9\,810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} * 1,30 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 441 \text{ m} * 93 \% * 96 \% * 100 \%$$

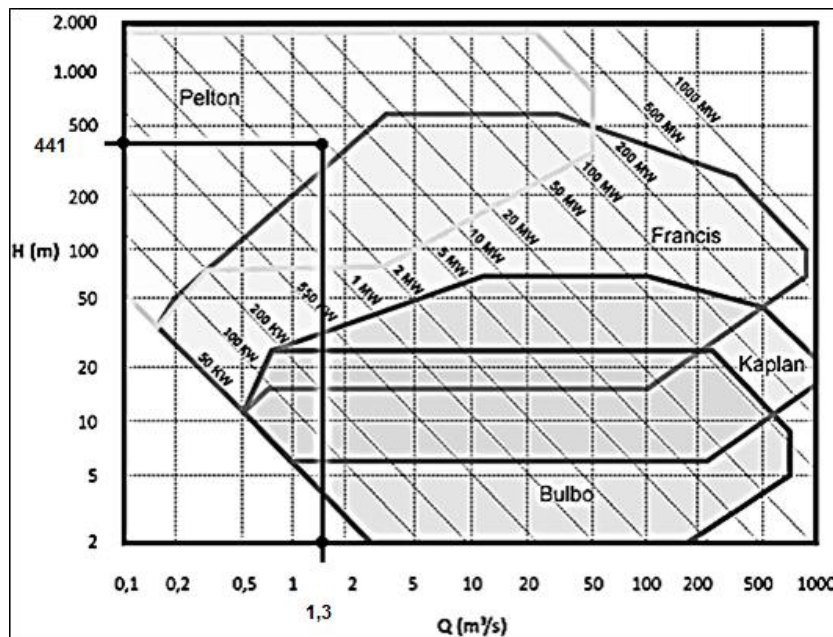
Obteniendo como resultado una potencia eléctrica de **5 021,17 kW**, siendo la estimación de la capacidad de generación de energía eléctrica producida como subproducto en la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy.

## 2.2.2. Central hidroeléctrica

Los principales elementos que deberán constituir la central hidroeléctrica son la turbina hidráulica y el generador eléctrico, los cuales fueron descritos al inicio de este capítulo. Habiendo estimado los parámetros hidráulicos y la capacidad de generación eléctrica es posible determinar las especificaciones técnicas básicas de los mismos. (Carta, Calero, Colmenar, & Castro, 2009)

Para determinar el tipo de turbina hidráulica, se utiliza la carta aplicación de turbinas en función del caudal y el salto hidráulico, donde especificará la turbina adecuada, según los parámetros ya mencionados, reservando el diseño de la turbina al fabricante a quien se deberá recurrir para obtener los detalles de diseño previo a la fase del proyecto. (Carta, Calero, Colmenar, & Castro, 2009)

Figura 9. Carta de aplicación de turbinas hidráulicas



Fuente: SciELO Colombia- Scientific Electronic Library Online, 2014.

Según la carta de aplicación de turbinas hidráulicas con los datos del caudal y salto hidráulico estimados, la intersección en dicha carta se ubica en el área de la turbina Pelton con una capacidad de generación cercana a los 5 MW, coincidiendo aproximadamente con los valores calculados matemáticamente. (Carta, Calero, Colmenar, & Castro, 2009)

Para determinar las características del generador considerando que los ejes de la turbina y del generador estarán acoplados directamente, se determinará la velocidad de rotación de la turbina y del generador, la cual recibe el nombre de velocidad específica siendo éste uno de los principales criterios para seleccionar dichas máquinas; para esto se determinará la velocidad específica cinemática  $N_s$  y la velocidad específica dinámica  $N_q$ , haciendo uso de las siguientes ecuaciones:

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

$$N_s = 3,03N_q$$

Donde  $N_s$  es la velocidad específica cinemática,  $N_q$  es la velocidad específica dinámica,  $Q$  es el caudal en metros cúbicos por segundo,  $H_N$  es el salto neto,  $N_T$  se refiere a velocidad de giro de la turbina, estas velocidades se dan en revoluciones por minuto rpm. (*European Small Hydropower Association - ESHA, 2006*)

La velocidad de giro de la turbina será definida por la velocidad sincrónica del generador eléctrico  $\eta_m$ , siendo ésta la velocidad mecánica del campo magnético en revoluciones por minuto, es decir, la velocidad del rotor del generador, considerando que el generador estará constituido por un número de

4 pares de polos. Donde  $f_e$  es la frecuencia eléctrica en Hertz y P el número de polos cuya ecuación es la siguiente:

$$n_m = \frac{120f_e}{P}$$

(Chapman, 2012)

Obteniendo los resultados de las ecuaciones anteriormente citadas:

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

$$n_m = N_T = 900 \text{ rpm}$$

Estando los ejes de la turbina hidráulica y del generador acoplados, la velocidad sincrónica deberá ser la misma velocidad de giro de la turbina, esta se determinará relacionando la velocidad específica cinemática y dinámica de la misma. (*European Small Hydropower Association - ESHA, 2006*)

$$N_q = \frac{900 \text{ rpm} * \sqrt[2]{1,3 \text{ m}^3/\text{s}}}{\sqrt[4]{(441 \text{ m})^3}} = 10,66 \text{ rpm}$$

$$N_s = 3,03 * 10,66 \text{ rpm} = 32,31 \text{ rpm}$$

Tabla IV. **Rango de aplicación de turbinas hidráulicas**

Tipo de turbina	$N_q$	$N_s$
Turbina Pelton 1 Tobera	Hasta 9	Hasta 18
Turbina Pelton 2 Tobera	4 a 13	14 a 42
Turbina Pelton 3 Tobera o mas	5 a 22	17 a 73

Fuente: manual mini y micro centrales hidroeléctricas, 2006.



Según la carta de aplicación de turbinas, se determinó que la turbina más apropiada es la turbina Pelton, y de acuerdo a la tabla anterior relacionando los valores de las velocidades específicas deberá estar compuesta por dos toberas, es decir, una turbina Pelton de 2 toberas. (*European Small Hydropower Association* - ESHA, 2006)

En la siguiente tabla, se presentan algunas especificaciones técnicas estimadas de los principales elementos que deberá disponer la central hidroeléctrica en la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy. (Municipalidad de Guatemala, 2015)

**Tabla V. Especificaciones técnicas estimadas del equipo electromecánico recomendable para la central hidroeléctrica Lo de Coy**

Turbina		Generador	
Tipo	Pelton	Frecuencia	60 Hz
Inyectores	2	Voltaje nominal de salida	6,9 Kv
Altura neta en metros	441	Potencia nominal	5 300 KVA
Caudal en litros/segundo	1 300	Corriente nominal	700 A
Velocidad en rpm	900	Aislamiento rotor-estator	F
Potencia en Kw	5 021,17	Velocidad en rpm	900
Potencia en Mw	5,02	Potencia en Mw	5,30
Eficiencia %	93	Eficiencia %	96
		Factor de potencia	0,9

Fuente: elaboración propia.

### **2.2.3. Subestación eléctrica**

En este apartado se mencionarán los equipos que representan mayor relevancia después del generador eléctrico, con los cuales deberá estar constituida la subestación eléctrica para la adecuada interconexión con la red de distribución. Asimismo el Administrador del Mercado Mayorista AMM y la empresa Distribuidora podrán solicitar algún equipo de protección adicional con la finalidad de evitar interrupciones en la red de distribución, en caso de suscitar alguna contingencia antes, durante y después del periodo de operación del Generador Distribuido Renovable. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014)

#### **2.2.3.1. Sistema de protección y control**

Su función primordial es reaccionar ante una falla simple o que actué de manera encadenada, evitando la destrucción de equipos o instalaciones. Aislando las fallas se reduce el daño al equipo y personal, garantizando la seguridad de operación en caso de contingencia o mantenimiento programado, siendo algunos dispositivos de protección:

- Cortacircuitos de potencia: diseñados para uso en subestaciones de potencia, donde los niveles de corriente de corto circuito son elevados, especializados en protección de transformadores, bancos de capacitores, etc. Pueden estar instalados en la intemperie, posee un fusible de plata sin soldaduras lo que ofrece un mejor ajuste en las curvas de disparo.
- Transformadores combinados: este tipo de transformadores posee en su interior un transformador de intensidad y un transformador de tensión inductivo. Su aplicación es la de separar el circuito de alta tensión,

instrumentos de medida, contadores y relés. Son dispositivos de alta precisión y respuesta frecuencial lo que permite la monitorización de la calidad de onda, medición de armónicos y resistente a los arcos internos, también se pueden utilizar para alimentar servicios auxiliares.

- Seccionador de cuchillas: también llamado cuchillas desconectadoras, estos pueden ser de apertura vertical para montaje en subestaciones, este dispositivo está dotado de un mecanismo de operación rígida permitiendo la separación a alta velocidad, su construcción favorece la apertura de las cuchillas de manera sincronizada lo que permite una adecuada coordinación del esfuerzo dieléctrico interno con la distancia externa de la cámara interruptiva, descartando la oportunidad de flameo.
- Interruptor de potencia: este dispositivo es de maniobra electromecánica, su función es la de conectar, interrumpir y restablecer circuitos eléctricos bajo condición normal y de falla aislando por completo los sistemas eléctricos. Asimismo tienen la capacidad de efectuar recierres de acuerdo a la secuencia de su constitución electromecánica.
- Pararrayos: su finalidad es proteger el equipo eléctrico de descargas electro-atmosféricas, atrayendo al rayo ionizado del aire para descargarlo a tierra de una manera segura para la subestación y operadores.
- Sistema de tierras: es un conjunto de electrodos o conductores desnudos los cuales se interconectan entre sí bajo la superficie de la tierra, destinados para disipar la corriente producida por cortocircuito, por falla o condición normal de los equipos para protegerlos además de brindar seguridad a los operadores.

(Grupo Tei México, 2009)

### **2.3. Factibilidad económica de generación eléctrica con un generador distribuido renovable**

La factibilidad económica en un proyecto permite deducir la conveniencia de ejecutar el proyecto, brinda un indicio de rentabilidad. El GDR puede comercializar la energía eléctrica que genere poniendo a disposición del mercado eléctrico. (Administrador del Mercado Mayorista, 2016)

#### **2.3.1. Análisis de beneficio**

Estos son los ingresos, también conocidos como utilidades procedentes de la venta de energía al mercado eléctrico local como resultado de la generación de energía eléctrica durante un tiempo de producción. El Administrador del Mercado Mayorista AMM se encarga de publicar el Informe de Transacciones Económicas ITE en donde detalla el precio SPOT de la energía en el nodo de referencia. Precio que se utilizará para realizar el análisis financiero de este documento, considerando el precio promedio que se presentó durante el primer semestre del año 2018, precio expresado en US\$ por MW-hora, siendo de US\$ 53,80. Según la estimación de la capacidad de generación de energía eléctrica para el GDR, se estima un importe económico por generación de energía eléctrica anual que suma los US\$ 2 324 283,91. (Administrador del Mercado Mayorista, 2018)

#### **2.3.2. Análisis de costo**

Comprende todas aquellas inversiones o desembolsos en efectivo o en especie hechos en el pasado, en el presente o en el futuro. Siendo los costos pasados los que no influyen en la evaluación. Los costos hundidos son aquellos desembolsos que se realizan en el presente, es decir, el instante que se

ejecute. Para este documento, no será considerado el costo hundido de diseño y construcción de la central hidroeléctrica y subestación eléctrica, ya que su costo puede variar en el instante que se desarrolle, ya que se deberá realizar a través de licitación con empresas reconocidas y con experiencia en la materia. Y los costos futuros son los presentes en los resultados proyectados en una evaluación. (Baca, 2010)

A continuación se detallan los egresos que influyen considerablemente a un generador de energía renovable durante su periodo de vida, siendo estos los costos de inversión, operación y mantenimiento:

- Costos de inversión: son los que corresponden a la generación de la capacidad de producir o funcionar, comprenden los costos por maquinaria, herramientas y construcciones, siendo estas las que se describen en la siguiente tabla. (Betún & Paucar, 2013)

Tabla VI. **Costos de inversión de equipo electromecánico en US\$ de la central hidroeléctrica Lo de Coy**

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unidad	Costo total
1.	Turbina Pelton 2 inyectores	U	1	2 300 359,60	2 300 359,60
2.	Generador eléctrico 4 polos	U	1	1 882 112,40	1 882 112,40
3.	Instrumentos de control, medida y protección	U	1	20 912,36	20 912,36
4.	Casa de máquinas	m <sup>2</sup>	25	600,00	15 000,00
<b>TOTAL</b>					<b>4 218 384,36</b>

Fuente: Betún, A. 2013.

- **Costos de operación y mantenimiento:** estos son los gastos necesarios para que el proyecto se mantenga operando y funcionando para el ciclo productivo, es considerado un costo que genera un bien. Los costos de mantenimiento serán programados anualmente siendo realizados semestralmente con un costo de US\$ 40 000,00 y se consideran las verificaciones por profesionales o proveedores de los equipos, y los materiales adicionales o repuestos con un costo anual de US\$ 30 000,00. (Baca, 2010)

Tabla VII. **Costos de operación y mantenimiento anual en US\$ de la central hidroeléctrica Lo de Coy**

No.	Descripción	Cantidad	Costo total anual
1.	Supervisores	3	84 000,00
2.	Personal operativo	6	67 000,00
3.	Gastos administrativos	-	15 000,00
4.	Materiales y repuestos	-	30 000,00
5.	Mantenimiento semestral	2	80 000,00
<b>TOTAL</b>			<b>276 000,00</b>

Fuente: elaboración propia.

- **Depreciación:** es el rendimiento del capital durante la vida útil del proyecto, no es un desembolso y no representa ningún costo efectivo, no es más que la disminución periódica del valor de un bien, siendo por desgaste por el uso y por deterioro natural. Según la Ley de Modernización del Impuesto Sobre la Renta no especifica ningún

porcentaje de depreciación relacionado a una hidroeléctrica, por lo que para los bienes muebles no indicados se utiliza 10 % anual utilizando el método lineal para su análisis. (Congreso de la República de Guatemala Decreto No. 2008, 2011)

### **2.3.3. Relación beneficio – costo**

Para este análisis, será necesario realizar un informe donde se presenten las entradas y salidas de caja en función del tiempo, siendo este el flujo neto de fondos, el cual ayudará a determinar la relación del análisis beneficio – costo de la central hidroeléctrica en la planta de tratamiento Lo de Coy, con los datos planteados anteriormente. Todos los siguientes valores se asumirán para determinar la factibilidad económica del proyecto, en tal sentido, se consideró que el proyecto podrá ser financiado por el ente municipal hasta un 25 % de la inversión, y el 75 % restante, a través de un préstamo de una institución de desarrollo con un servicio de deuda de diez años plazo para la amortización de capital más intereses, a una tasa de interés del 7 % anual sobre saldos con cuota nivelada, dato obtenido de las tasas promedio ponderada de cartera de créditos por actividad económica la Superintendencia de Bancos de Guatemala. Se estima que el equipo electromecánico a los diez años tendrá una tercera parte vida útil de diez años, tendrá un valor de rescate de US\$1 000 000, un costo de oportunidad del 27 %. (Superintendencia de Bancos de Guatemala, 2016)

Tabla VIII. **Cálculo de amortización financiamiento del proyecto en US\$ de la central hidroeléctrica Lo de Coy**

Año	Saldo inicial	Amortización K	Amortización I	Saldo final
1	3 163 788	228 987	221 465	2 934 801
2	2 934 801	245 016	205 436	2 689 785
3	2 689 785	262 167	188 285	2 427 618
4	2 427 618	280 519	169 933	2 147 099
5	2 147 099	300 155	150 297	1 846 943
6	1 846 943	321 166	129 286	1 525 777
7	1 525 777	343 648	106 804	1 182 129
8	1 182 129	367 703	82 749	814 426
9	814 426	393 442	57 010	420 983
10	420 983	420 983	29 469	0
		<b>3 163 788</b>	<b>1 340 734</b>	<b>4 504 523</b>

Fuente: elaboración propia.

Con la información de la tabla anterior, serán procesados los datos para describir la siguiente tabla, donde se plantea el flujo neto de fondos con la que se establecerán los parámetros de evaluación económica del análisis beneficio – costo del proyecto en US\$ de la central hidroeléctrica Lo de Coy. (Municipalidad de Guatemala, 2015)



Tabla IX. **Flujo neto de fondos del proyecto en US\$ de la central hidroeléctrica Lo de Coy**

CONCEPTO	AÑO											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>INGRESOS</b>		<b>2,324,240</b>	<b>2,324,240</b>	<b>2,324,240</b>	<b>2,324,240</b>	<b>2,324,240</b>	<b>2,324,240</b>	<b>2,324,240</b>	<b>2,324,240</b>	<b>2,324,240</b>	<b>2,324,240</b>	<b>2,324,240</b>
( + ) Ingresos de operación		2,324,240	2,324,240	2,324,240	2,324,240	2,324,240	2,324,240	2,324,240	2,324,240	2,324,240	2,324,240	2,324,240
<b>COSTOS</b>		<b>919,304</b>	<b>903,275</b>	<b>886,123</b>	<b>867,772</b>	<b>848,135</b>	<b>827,124</b>	<b>804,643</b>	<b>780,587</b>	<b>754,848</b>	<b>727,307</b>	
( - ) Costos de operación		276,000	276,000	276,000	276,000	276,000	276,000	276,000	276,000	276,000	276,000	276,000
( - ) Depreciación		421,838	421,838	421,838	421,838	421,838	421,838	421,838	421,838	421,838	421,838	421,838
( - ) Costos financieros		221,465	205,436	188,285	169,933	150,297	129,286	106,804	82,749	57,010	29,469	
( - ) Pago de intereses		221,465	205,436	188,285	169,933	150,297	129,286	106,804	82,749	57,010	29,469	
<b>GANANCIA NETA GRAVABLE</b>		<b>1,404,936</b>	<b>1,420,965</b>	<b>1,438,117</b>	<b>1,456,468</b>	<b>1,476,105</b>	<b>1,497,115</b>	<b>1,519,597</b>	<b>1,543,652</b>	<b>1,569,392</b>	<b>1,596,933</b>	
Impuesto sobre la Renta (10%)	10%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>GANANCIA CONTABLE</b>		<b>1,404,936</b>	<b>1,420,965</b>	<b>1,438,117</b>	<b>1,456,468</b>	<b>1,476,105</b>	<b>1,497,115</b>	<b>1,519,597</b>	<b>1,543,652</b>	<b>1,569,392</b>	<b>1,596,933</b>	
( + ) Pago de intereses		221,465	205,436	188,285	169,933	150,297	129,286	106,804	82,749	57,010	29,469	
( + ) Depreciaciones		421,838	421,838	421,838	421,838	421,838	421,838	421,838	421,838	421,838	421,838	
( + ) Valor de rescate												1,000,000
<b>SUBTOTAL</b>		<b>2,048,240</b>	<b>2,048,240</b>	<b>2,048,240</b>	<b>2,048,240</b>	<b>2,048,240</b>	<b>2,048,240</b>	<b>2,048,240</b>	<b>2,048,240</b>	<b>2,048,240</b>	<b>2,048,240</b>	<b>3,048,240</b>
<b>INVERSIONES</b>												
Equipo electromecánico	(4,218,384)											
( + ) Crédito recibido	3,163,788											
( - ) Amortizaciones a Capital		228,987	245,016	262,167	280,519	300,155	321,166	343,648	367,703	393,442	420,983	
<b>FLUJO NETO DE FONDOS</b>	<b>(1,054,596)</b>	<b>1,819,253</b>	<b>1,803,224</b>	<b>1,786,073</b>	<b>1,767,721</b>	<b>1,748,085</b>	<b>1,727,074</b>	<b>1,704,592</b>	<b>1,680,537</b>	<b>1,654,797</b>	<b>1,627,256</b>	

Fuente: elaboración propia.

Para interpretar el resultado de la relación del análisis beneficio – costo, si el cociente es mayor que 1, significa que los beneficios son mayores que los costos y si es menor que 1, los costos son mayores que los beneficios.

$$\text{Relacion beneficio – costo} = \frac{\text{Valor presente beneficios}}{\text{Valor presente costos}}$$

$$\text{Relacion } B - C = \frac{6\,044\,100}{1\,054\,596} = 5,73 \gg 1$$



### 3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1. Presentación de resultados

En esta sección se presentan los resultados o respuestas obtenidas de las preguntas auxiliares de investigación, de las cuales surgió la pregunta central de este documento. Cuyo análisis fue desarrollado en los capítulos anteriores, a los cuales se hará referencia en esta fase.

- ¿Cómo estimar el potencial hidráulico de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy?

Para estimar el potencial hidráulico de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, fue necesaria la obtención del caudal histórico, información proporcionada luego de una audiencia con el Director y Subdirector de aguas superficiales de Empagua; además, se identificó que dicha planta de tratamiento se abastece del agua superficial de los ríos Xayá y Pixcayá. Del río Xayá el agua es captada, a través de una presa de derivación La Sierra ubicada a 2 100 msnm. Agua conducida a través de una tubería al cause Balanyá, para luego unirse al río Pixcayá en la presa de derivación El Tesoro para tomar el caudal total, estas obras civiles y líneas de conducción son conocidas como acueducto Xayá Pixcayá, el cual llega hasta la entrada de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, ubicada a 1 610 msnm. Relacionando estos datos, se determinó una altura neta de 441 metros y se estimó un caudal promedio de 1,30 m<sup>3</sup>/s.

- ¿Qué capacidad deberá tener el sistema de generación de energía eléctrica?

Para determinar esta capacidad, se precisó hacer uso de análisis de máquinas hidráulicas y eléctricas con los datos anteriormente estimados. Este estudio dio como resultado de capacidad de generación de energía eléctrica que puede suministrar como subproducto la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, una energía de 120 MWh y una potencia máxima de 5 MW.

- ¿Será rentable la generación eléctrica por medio de un generador distribuido renovable?

Para identificar la rentabilidad, a través de la generación de energía eléctrica es necesario determinar la factibilidad económica del proyecto, para esto fue necesario considerar los ingresos y costos en un flujo neto de fondos, siendo los ingresos todo aquello que se adquiriera por la venta de energía eléctrica, y los costos siendo los de inversión, operación y mantenimiento. De este análisis, se obtuvo una tasa interna de retorno (TIR) de 1.72, y un índice de rentabilidad que se obtuvo, a través de la relación del beneficio neto, después de impuestos es decir la suma de la ganancia contable y fondos propios, es decir, la suma del flujo neto de fondos, siendo este índice de rentabilidad (IR) de 86 %.

### **3.2. Discusión de resultados**

Se identificó el comportamiento de la producción de agua cruda en m<sup>3</sup>/s hasta el año 2028, en la planta de tratamiento, a través de análisis de serie de tiempo y el método autoregresivo AR (2), siendo este último que obtuvo mejor ajuste con los registros históricos reales, del cual se obtuvo un menor error

típico de 1,28 % con una desviación estándar de 0,2 con un caudal medio de diseño proyectado de 1,30 m<sup>3</sup>/s. Obteniendo como resultado que la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy posee suficiente potencial hidráulico, para un proyecto hidroeléctrico sin embalse y sin generar mayor impacto a las condiciones actuales de dicha planta de tratamiento.

Se desarrolló la curva de duración de caudales con los resultados proyectados con los dos modelos utilizados, siendo el método autoregresivo AR (2), que obtuvo mejor ajuste, identificando el caudal máximo al 3 % del tiempo de 1,80 m<sup>3</sup>/s; un caudal de estiaje al 95 % del tiempo de 0,97 m<sup>3</sup>/s y un caudal medio al 50 % del tiempo de 1,30 m<sup>3</sup>/s. Considerando como crítico el caudal de estiaje entregando aproximadamente 90 MWh de energía eléctrica y 3,75 MW de potencia eléctrica, con un importe económico estimado por generación de energía eléctrica anual de US\$ 1 741 617,00.

La capacidad de generación de energía eléctrica estimada para la central hidroeléctrica Lo de Coy cumple, según la normativa del país para ser considerada como un Generador Distribuido Renovable, ya que su potencia máxima de generación está dentro del rango admitido según la Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y usuarios autoprodutores NTGDR.

Según resultados de acuerdo a las delimitaciones planteadas al inicio del desarrollo de este documento, posterior al análisis de factibilidad económica de generación eléctrica con un GDR en la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, se obtuvo como resultado que es rentable.



## CONCLUSIONES

1. De los resultados derivados del análisis de modelos estadísticos y matemáticos, se estimó para el año 2028 un caudal medio mensual de 1,30 m<sup>3</sup>/s, lo que permite considerar que la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, que posee el potencial hidráulico suficiente para generar como subproducto energía eléctrica.
2. La capacidad de generación de energía eléctrica por día es de 120 MWh como subproducto de la planta de tratamiento de agua potable, con una potencia eléctrica estimada de 5 MW, la cual está dentro de los parámetros que establece la Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía NTGDR para ser considerada como un GDR.
3. El análisis económico desarrollado considerando que el estudio delimita algunos parámetros, porque ya existen en funcionamiento y otros, por ser costos hundidos, se logró determinar que la generación de energía eléctrica como subproducto en la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy es rentable económicamente, según el resultado de la tasa interna de retorno es de 1,72 recuperando la inversión al finalizar el servicio de deuda de diez años, entregando utilidades directas, a partir del onceavo año de operación, con un índice de rentabilidad del 86 %.





## RECOMENDACIONES

1. Propiciar el monitoreo hidrológico de la cuenca del río Xayá y Pixcayá desarrollando un plan de gestión del recurso hídrico, que permita identificar su manejo sostenible, para obtener una utilización integral de la misma.
2. Implementar un medidor inteligente en la caja de entrada que permita registrar e identificar el caudal de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy.
3. Previo al inicio del proyecto es recomendable contar con un conjunto de profesionales, para la asesoría o consultoría para la correcta selección de los equipos electromecánicos, incluyendo la asistencia de los proveedores, con el objeto de contribuir favorablemente para la toma de decisiones, según las características de los equipos adecuados y al mejor precio.
4. Adquirir los equipos electromecánicos, según contrato llave en mano, con la finalidad de garantizar su desembalaje, transporte, instalación, montaje y puesta en funcionamiento del equipo, ya que poseen experiencia en sus equipos lo que reduce inconvenientes durante la puesta en marcha y posterior operación.
5. Para el diseño y construcción de la central hidroeléctrica y la subestación de enlace a la red de transmisión deberá realizarse con empresas homologadas que otorguen un plan adecuado de garantía,

instalación y mantenimiento para no incurrir en sanciones por no disponer de energía eléctrica según como se adjudique la venta de la misma al mercado eléctrico.

6. Previo a la toma de decisión de la ejecución del proyecto, teniendo las ofertas de las empresas oferentes que sean adjudicados luego de la licitación del diseño de la central hidroeléctrica y subestación eléctrica que fueron tomados en esta investigación como costos hundidos los cuales no se consideraron, se recomienda integrar estos costos a la inversión inicial para identificar si el proyecto continua siendo rentable.
7. Aplicar este diseño de investigación en otras plantas de tratamiento para identificar el potencial de generación de energía eléctrica, la cual puede suministrarse a la red del distribuidor para la respectiva comercialización, o bien utilizar dicha energía eléctrica para autoabastecerse como por ejemplo, en plantas de bombeo, logrando reducir los costos por consumo de energía eléctrica. Cabe resaltar que para obtener resultados favorables en el desarrollo de la investigación, se requiere del acceso de cotas para identificar el salto neto y del registro histórico de caudales reales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Administrador del Mercado Mayorista. (21 de agosto de 2018). *Informe de transacciones económicas*. [En línea] <<http://www.amm.org.gt>> [Consulta: 9 de mayo de 2016].
2. Baca, G. (2010). *Evaluación de Proyectos* (Sexta ed.). México, D. F.: The McGraw-Hill companies, Inc. 318 p.
3. Beljansky, M. (2012). *Matriz energética: sus implicancias en la huella de carbono de productos*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. 117 p.
4. Betún, A., & Paucar, M. (2013). *Estudio de factibilidad técnica económica de la central hidroeléctrica Ulpan*. Ecuador. 168 p.
5. Carta, J. A., Calero, R., Colmenar, A., & Castro, M. A. (2009). *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. Madrid: Pearson Educación, S.A. 703 p.
6. Chapman, S. J. (2012). *Maquinas eléctricas*. México: McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A. de C.V. 768 p.
7. COGUANOR - Comisión Guatemalteca de Normas. (abril de 1999). *Agua Potable - Especificaciones, COGUANOR NGO 29 001:99*. Guatemala, Guatemala. 15 p.

8. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (25 de agosto de 2014). *Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía*. [En línea] <<http://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/Normas%20Tecnicas/08%20NTGDR.pdf>> [Consulta: 15 de abril de 2015].
9. Congreso de la República de Guatemala Decreto No. 2008. (2011). *Ley de Modernización del Impuesto Sobre la Renta*. Guatemala. [En línea] <[http://www.minfin.gob.gt/archivos/prensa/ley\\_isr.pdf](http://www.minfin.gob.gt/archivos/prensa/ley_isr.pdf)> [Consulta: 16 de abril de 2015].
10. Constitución Política de la República de Guatemala. (31 de mayo de 1985). Guatemala, República de Guatemala. 76 p.
11. European Small Hydropower Association - ESHA. (2006). *Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica*. (SHERPA, Trad.) Europa. 310 p.
12. Fajardo, M. M. (Abril de 2009). Tesis MSc. Energía y Ambiente. *Determinación del potencial hidroenergético del sistema de abastecimiento de agua potable de Santa Cruz La Laguna, Sololá y propuesta de aplicación en instalaciones municipales*. Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Estudios de Postgrado. 105 p.
13. Fitzgerald, A. E., Kingsley, J., & Umans, S. D. (1992). *Máquinas eléctricas*. México: Editorial Hispano Europea Barcelona España. 587 p.

14. Grupo Tei México. (2009). Grupo Tei México. *Energía y Calidad sin Límites*. [En línea] <<http://grupoteimexico.com.mx/>> [Consulta: 12 de mayo de 2016].
15. Jocholá, D. E. (2011). Tesis Ing. Química. *Diseño del proceso de envasado de agua potable proveniente de la planta de tratamiento de agua potable "Lo de Coy" de la empresa municipal de agua (EMPAGUA)*. [En línea] < [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_1186\\_Q.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1186_Q.pdf) > [Consulta: 22 de agosto de 2016].
16. Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable. (28 de octubre de 2003). Congreso de la República de Guatemala Decreto numero 52-2003. Guatemala, República de Guatemala. 4 p.
17. Ley General de Electricidad. (16 de octubre de 1996). Decreto número 93-96 Congreso de la República de Guatemala. Guatemala, República de Guatemala. 18 p.
18. Lux, M. A. (Septiembre de 2010). *Medidores de flujo en canales abiertos*. Guatemala: Tesis Facultad de Ingeniería - Escuela de Ingeniería Civil. 109 p.
19. Ministerio de Energía y Minas República de Guatemala. (s.f.). *Recursos Energéticos Renovables*. [En línea] <<http://www.mem.gob.gt/viceministerio-del-area-energetica-2/energias-renovables/recursos-energeticos-renovables/>> [Consulta: 20 de agosto de 2015].

20. Mohr, R. A. (Agosto de 2007). Tesis Magíster en Ciencias de la Ingeniería. *Inserción de generadores de energía renovable en redes de distribución*. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería. 113 p.
21. Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. En C. Salazar Perdomo, & J. Cañas Sepúlveda (Edits.). Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería. 330 p.
22. Municipalidad de Guatemala. (2015). *Municipalidad de Guatemala*. [En línea] <<http://mu.muniguate.com/index.php/component/content/article/40-empagua/48-xayapixcayacoy>> [Consulta: 20 de agosto de 2015].
23. Peña, D. (Octubre de 2010). *Análisis de series temporales*. 2 Edición. Alianza Editorial. 608 p.
24. Proquim - Capre. (Octubre de 1991). *Fichas técnicas de plantas de tratamiento para agua potable*. [En línea] < [http://www.infoiarna.org.gt/guateagua/subtemas/7/Agua\\_ps/FICHAS\\_TECNICAS\\_PLANTAS\\_TRATAMIENTO.pdf](http://www.infoiarna.org.gt/guateagua/subtemas/7/Agua_ps/FICHAS_TECNICAS_PLANTAS_TRATAMIENTO.pdf).> [Consulta: 22 de agosto de 2016].
25. Reglamento de la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable. (16 de junio de 2005). Acuerdo Gubernativo Número 211-2005. Guatemala, República de Guatemala. 104 p.
26. Reglamento de la Ley General de Electricidad. (21 de marzo de 1997). Acuerdo Gubernativo Número 256-97. Guatemala, República de Guatemala. 64 p.

27. Saldarriaga, J. (2008). *Hidráulica de tuberías*. (G. Santos, Ed.) Santafé de Bogota, Colombia: McGraw Hill. 564 p.
28. Superintendencia de Bancos de Guatemala. (2016). *Tasa promedio ponderada de cartera de crédito por actividad económica*. Guatemala. [En línea] <<http://infpb.sib.gob.gt/ConsultaDinamica/?cons=21>> [Consulta: 27 de mayo de 2016].
29. Ubidia A., E. N. (Diciembre de 2015). Operación en red aislada del sistema eléctrico de EPMAPS. Escuela Politécnica Nacional, Quito. [En línea] <<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/12050>> [Consulta: 15 de agosto de 2018].
30. University of Texas at Austin Libraries. (2006). Guatemala Topographic Maps Serie E754. *Ciudad de Guatemala(E754), 4-NIMA*, 2059 I. Austin, Texas, EE.UU. [En línea] <[http://www.lib.utexas.edu/maps/topo/guatemala/ciudad\\_de\\_guatemala-guatemala-40k-2059i-2000.pdf](http://www.lib.utexas.edu/maps/topo/guatemala/ciudad_de_guatemala-guatemala-40k-2059i-2000.pdf)> [Consulta: 27 de diciembre de 2015].
31. University of Texas at Austin Libraries. (2006). Guatemala Topographic Maps Serie E754. *Chimaltenango(E754), 2-NGA*, 2059 IV. Austin, Texas, EE.UU. [En línea] <<http://www.lib.utexas.edu/maps/topo/guatemala/chimaltenango-guatemala-50k-2059iv-2006.pdf>> [Consulta: 27 de diciembre de 2015].
32. Villón B. M. (2004). *Hidrología*. Cartago, Costa Rica: Tecnológica de Costa Rica. 194 p.

33. Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. &. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (Novena edición ed.). Naucalpan de Juárez, México: Pearson. 792 p.



## **ANEXOS**

### **1. Mecanismo regulatorio de Guatemala**

#### **Constitución Política de la República de Guatemala**

Todo ciudadano de la República de Guatemala tiene el compromiso de apoyar el desarrollo tecnológico que evite la contaminación del ambiente y con esto también se logra apoyar el desarrollo social y económico. Una manera de evitar la contaminación del ambiente, en este caso específicamente, es la hidroelectricidad con GDR. Esta favorece la disminución del uso de combustibles fósiles para la generación de electricidad, sustituyéndolo por energías renovables que compensen la capacidad de generación actual. Por ello es preciso hacer mención de la máxima ley. (Constitución Política de la República de Guatemala, 1985)

La Constitución Política de la República de Guatemala indica en el Artículo 97 que: “El Estado, las municipalidades y los habitantes del territorio nacional están obligados a propiciar el desarrollo social, económico y tecnológico que prevenga la contaminación del ambiente y mantenga el equilibrio ecológico. Se dictarán todas las normas necesarias para garantizar que la utilización y aprovechamiento de la fauna, de la flora, de la tierra y del agua, se realicen racionalmente, evitando la depredación”. (Constitución Política de la República de Guatemala, 1985)

Artículo 119 de la Constitución Política de la República de Guatemala: es obligación fundamental del Estado suscitar el desarrollo de la economía de todo

el país, adoptando los lineamientos adecuados para la conservación, desarrollo y utilización de los recursos naturales en forma eficiente, valiéndose que el desarrollo de los recursos energéticos renovables son de urgencia e interés nacional. (Constitución Política de la República de Guatemala, 1985)

En el Artículo 128 de la Constitución Política de la República de Guatemala indica que: “El aprovechamiento de aguas, lagos y ríos, el aprovechamiento de las aguas de los lagos y de los ríos, para fines agrícolas, agropecuarios, turísticos o de cualquier otra naturaleza, que contribuya al desarrollo de la economía nacional, está al servicio de la comunidad y no de persona particular alguna, pero los usuarios están obligados a reforestar las riberas y los cauces correspondientes, así como a facilitar las vías de acceso”. (Constitución Política de la República de Guatemala, 1985)

El Artículo 129 de la Constitución Política de la República de Guatemala declara: “De urgencia nacional, la electrificación del país, con base en planes formulados por el Estado y las municipalidades, en la cual podrá participar la iniciativa privada”. (Constitución Política de la República de Guatemala, 1985)

### **Ley General de Electricidad**

Asimismo, el Congreso de la República de Guatemala emite el Decreto número 93-1996, en donde crea la Ley General de Electricidad. Para este caso particular, se hace mención en el Artículo 8 lo siguiente: “Es libre la instalación de centrales generadoras, las cuales no requerirán de autorización de ente gubernamental alguno y sin más limitaciones que las que se den de la conservación del medio ambiente y de la protección a las personas, a sus derechos y a sus bienes. No obstante, para utilizar con estos fines los que sean

bienes del Estado, se requerirá de la respectiva autorización del Ministerio cuando la potencia de la central exceda de 5 MW”.

(Ley General de Electricidad, 1996)

También, en interés del medio ambiente, es necesario realizar un estudio de impacto ambiental como lo establece en el Artículo 10 de la Ley General de Electricidad, donde: “Los proyectos de generación y de transporte de energía eléctrica deberán adjuntar evaluación de impacto ambiental. Se determinará a partir del estudio respectivo, el que deberá ser objeto de dictamen por parte de la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), quien se encargará de definir en un tiempo específico la aprobación o improbación, o la aprobación con recomendaciones del proyecto”. (Ley General de Electricidad, 1996)

### **Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable**

El Congreso de la República de Guatemala en consideración al Artículo 119 y 129 de la Constitución Política de la República de Guatemala, formula el Decreto número 52-2003, creando la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable. Declarando de urgencia e interés nacional el desarrollo racional de los recursos energéticos renovables, haciendo hincapié en que el órgano competente estimulará, promoverá, facilitará y creará las condiciones adecuadas para el fomento de inversiones que se hagan con ese fin, para alcanzar el objetivo de promover el desarrollo de proyectos de energía renovable, estableciendo incentivos fiscales, económicos y administrativos para tal efecto. Dichos incentivos son mencionados en el Artículo 5 de la presente ley, en donde nombra a las municipalidades, el Instituto Nacional de Electrificación (INDE), empresas mixtas, y las personas individuales y jurídicas que realicen proyectos de energía con recursos energéticos renovables gozarán de los incentivos, siendo los siguientes:

- Exención de derechos arancelarios para las importaciones, incluyendo el impuesto al valor agregado (IVA).
- Exención del pago del impuesto sobre la renta (ISR).
- Exención del Impuesto a las empresas mercantiles y agropecuarias (IEMA).

(Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable, 2003)

### **Reglamento de la Ley General de Electricidad**

El reglamento de la Ley en mención, en el Artículo 14 trata sobre las requerimientos de las centrales hidroeléctricas especificando que: “Es necesaria la autorización para el uso de recursos hidráulicos que se ocupen para generación de electricidad cuando la potencia de la central exceda 5 MW, cualquiera que sea la potencia, cuando para la construcción de la central se requieren de obras de embalse que puedan afectar el régimen hidrológico de un río o la seguridad de personas y bienes ubicados aguas abajo, se requerirá que la construcción y operación de las instalaciones se adecue a lo que establezca la comisión al respecto, para garantizar la protección de las personas, sus derechos y bienes”. (Reglamento de la Ley General de Electricidad, 1997)

También en el Artículo 16 bis se enfoca en el desarrollo de la GDR, Artículo que fuera adicionado por el Artículo 3 Acuerdo Gubernativo No. 68-2007, indica lo siguiente: “Los distribuidores están obligados a permitir la conexión a sus instalaciones y a efectuar las modificaciones o ampliaciones necesarias para permitir el funcionamiento del Generador Distribuido Renovable. Para lo cual deberá determinar la capacidad del punto de conexión y las ampliaciones necesarias para permitir el funcionamiento del Generador

Distribuido Renovable, para lo cual deberá determinar la capacidad del punto de conexión y las ampliaciones necesarias de sus instalaciones”.

(Reglamento de la Ley General de Electricidad, 1997)

Previo a su autorización, la comisión evaluará la pertinencia del alcance de las modificaciones y de las ampliaciones de las instalaciones de los distribuidores; así como su respectivo costo y los beneficios por la mejora en la calidad del servicio de distribución y por la reducción de pérdidas, los costos de las ampliaciones, modificaciones, línea de transmisión y equipamiento necesarios para llegar al punto de conexión con la red de distribución, estarán a cargo del Generador Distribuido Renovable. (Reglamento de la Ley General de Electricidad, 1997)

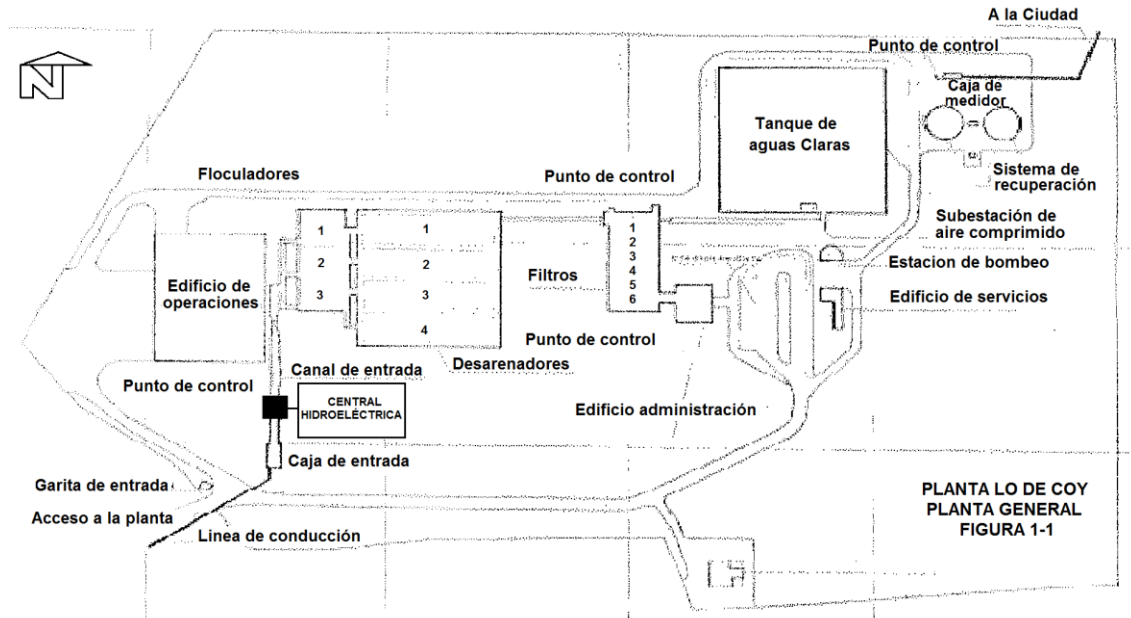
### **Reglamento de la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable**

En el Artículo 1 del Reglamento de la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable se plantea el objetivo de dicho reglamento. “En él se fundamenta el desarrollar los preceptos normativos de la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable y asegurar las condiciones adecuadas para la calificación y aplicación concreta de los incentivos establecidos en la indicada ley”. (Reglamento de la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable, 2005)

En este reglamento en el Artículo 17 también expone la aplicación concreta de los incentivos en donde: “El titular del proyecto que utiliza recursos renovables calificado por el Ministerio, este extenderá una certificación con la cual realizará la solicitud de incentivos en la Superintendencia de Administración Tributaria (SAT), incluyendo el listado de insumos totales o

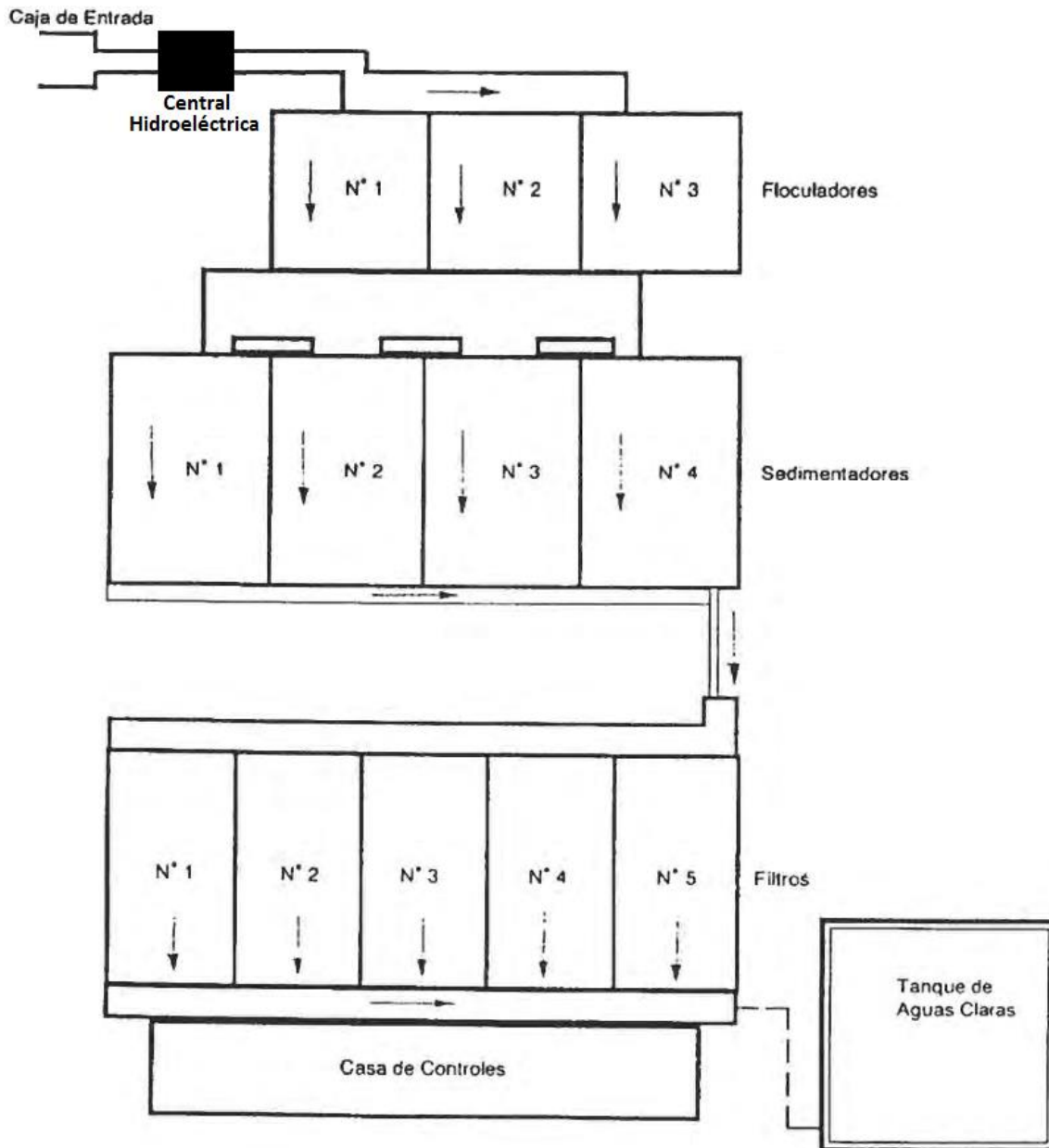
parciales que serán objeto de incentivos, en los casos que proceda”.  
(Reglamento de la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de  
Energía Renovable, 2005)

2. Plano general de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, con la Central hidroeléctrica



Fuente: Jocholá, 2011.

3. Esquema de procesos de la planta de tratamiento de agua potable  
Lo de Coy, con la Central hidroeléctrica



Fuente: Proquim – Capre, Octubre 1991.