



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**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**

Alan Manolo López Gálvez

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

Guatemala, abril de 2016

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

ALAN MANOLO LÓPEZ GÁLVEZ

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

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, ABRIL DE 2016

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	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

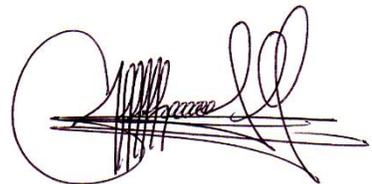
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández
EXAMINADOR	Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

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 asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 16 de 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.

Alan Manolo López Gálvez



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226



ADSE-MEAPP-0004-2015

Guatemala, 16 de Octubre de 2015.

Director:
Francisco Javier González López
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante Alan Manolo López Gálvez con carné número 2004 18424, quien opto la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Energía y Ambiente.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

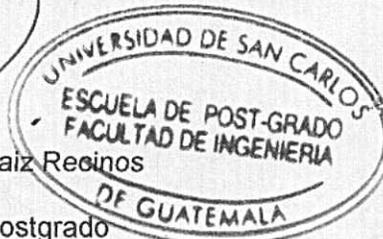
Msc. Ing. Víctor Manuel de León Contreras
Asesor (a)

VICTOR MANUEL DE LEON CONTRERAS
INGENIERO ELECTRICISTA COL. 7739
FORM. Y EVALUAC. DE PROYECTOS MSc.

Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Área
Desarrollo Social y Energético

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504

MSc. Ing. Murphy Olympto Paiz Reinos
Director
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo
/ec



REF. EIME 40.2016.

Guatemala, 8 de ABRIL 2016.

FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística de su Proyecto de Graduación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado 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 estudiante universitario Alan Manolo López Gálvez, considerando que el protocolo es viable para realizar el Diseño de Investigación procedo aprobarlo, ya que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad de Ingeniería.

LEER Y ENSEÑAR A TODOS

Ing. Francisco Javier González López
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

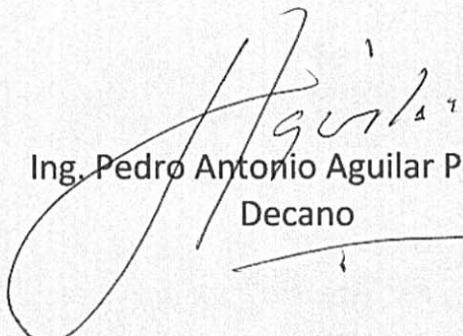




DTG. 163.2016

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 Ingeniería Mecánica Eléctrica, 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 estudiante universitario: **Alan Manolo López Gálvez,** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, abril de 2016

/gdech

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, 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:

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

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
RESUMEN.....	VII
INTRODUCCIÓN.....	IX
1. ANTECEDENTES	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
3. JUSTIFICACIÓN	5
4. OBJETIVOS	7
5. ALCANCES Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	9
6. MARCO TEÓRICO.....	11
6.1. Definición.....	11
6.2. Recurso energético primario.....	11
6.2.1. Recursos renovables	12
6.2.1.1. Hidroelectricidad	13
6.2.1.2. Geotérmico	13
6.2.1.3. Eólico.....	13
6.2.1.4. Solar	14
6.2.1.5. Biomásica	14
6.2.2. Recursos no renovables	15

6.3.	Mecanismo del marco regulatorio	15
6.3.1.	Constitución Política de la República de Guatemala.....	16
6.3.2.	Ley General de Electricidad	17
6.3.3.	Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable.....	18
6.3.4.	Reglamento de la Ley General de Electricidad	19
6.3.5.	Reglamento de la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable.....	20
6.3.6.	Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía.....	21
6.4.	Ventajas y desventajas para la distribuidora	24
6.4.1.	Ventajas	24
6.4.2.	Desventajas.....	26
6.5.	Análisis técnico	27
6.5.1.	Generalidades	27
6.5.1.1.	Turbina hidráulica.....	27
6.5.1.1.1.	Turbina Kaplan.....	28
6.5.1.1.2.	Turbina Pelton.....	28
6.5.1.1.3.	Turbina Francis	28
6.5.1.1.4.	Turbina Banki-Michell....	29
6.5.1.2.	Generador eléctrico.....	29
6.5.1.2.1.	Generador síncrono	30
6.5.1.2.2.	Generador asíncrono	32
7.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO	33
8.	METODOLOGÍA	35

9.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	37
10.	CRONOGRAMA.....	39
11.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	41
11.1.	Recurso humano	41
11.2.	Recurso físico.....	41
11.3.	Recurso técnico.....	41
11.4.	Recurso financiero.....	41
12.	BIBLIOGRAFÍA	43

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Metodología esquemática	36
2.	Diagrama de Gantt	39

TABLAS

I.	Recurso financiero	42
----	--------------------------	----

RESUMEN

Este 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, pretende mostrar un recurso disponible que se encuentra sin uso, siendo posible aprovecharlo aplicando la tecnología adecuada para obtener un producto adicional.

Este producto es la generación de energía eléctrica haciendo uso de la producción de agua cruda de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, siendo generada por un recurso renovable. Este tipo de energía eléctrica no representa daños al medio ambiente, y disminuye la demanda de energía eléctrica producida por fuentes no renovables.

Inicialmente se investigó información relacionada al tema en donde no se identificó existencia en Guatemala sobre algún tipo de generación de energía eléctrica valiéndose de la construcción de las plantas de tratamiento o plantas de bombeo existentes en el país, siendo oportuna la siguiente investigación.

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 y 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 ostentosamente por la razón que ya se cubrió la necesidad básica, limitando en si el potencial adicional que poseen las plantas de tratamiento.

Este documento presenta una solución para aprovechar este recurso hidráulico que se desperdicia, valiéndose de la construcción de 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, este 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. Esto a través de una fuente limpia y renovable utilizando los recursos de una manera más responsable y eficiente para mejorar la calidad de vida para todos, sin provocar daños al ecosistema.

En la primera parte de esta investigación se describen los antecedentes relacionados al tema y del marco energético 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 para la conexión a la red de distribución.

En la tercera parte se realiza el análisis e interpretación de los resultados, para 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 realizarse por medio de licitación con empresas reconocidas en donde el beneficio y costo dependerá de la oferta que presenten.

1. ANTECEDENTES

En 2013 fue presentada, en la Universidad de la Rioja de España, la tesis doctoral con el título de *Generación de energía eléctrica por fuentes de energías renovables en la red de abastecimiento de agua potable del espacio urbano*, por Niño Martín, Daniel. Esta es orientada al alcance del aprovechamiento hidroeléctrico en las redes de distribución de agua potable en zonas urbanas. Valiéndose del desnivel o caída de agua para obtener energía mecánica, y luego convertirla en energía eléctrica. (Niño Martín, 2013)

En octubre del 2013 se presentó en la Universidad Politécnica de Cataluña Barcelona, la tesis de maestría con el título de *Microturbinas para generación eléctrica en redes de Abastecimiento de agua potable de Cataluña*, por Sanz Noguera, Víctor. La investigación es un estudio para identificar los lugares susceptibles para implementar una microturbina en la red de abastecimiento de agua potable dentro de la provincia de Barcelona para generación eléctrica. (Sanz Noguera, 2013)

Desde 1956 la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento en Quito Ecuador, conocida también como EPMAPS, inició labores aprovechando los recursos hídricos. Esto para suministrar agua potable y por las necesidades de bombear agua a lugares donde la misma no se conducía por medio de gravedad, surgió la solución de implantar microturbinas que produjeran la energía necesaria para alimentar eléctricamente las bombas. En 1990 se inician labores en la nueva central hidroeléctrica llamada Recuperadora, capaz de generar 14,7 MW. En el 2000 inició a laborar otra central hidroeléctrica llamada El Carmen aportando 8,3 MW. En la actualidad

poseen proyectos planificados para agregar nuevas centrales y con esto contribuir a la descontaminación del agua de los ríos de Quito. (EPMAPS, s.f.)

La empresa Lucid Energy que inició labores en 2007, en la ciudad de Portland del estado de Oregón en Estados Unidos, se ha encargado de diseñar un sistema llamado LucidPipe™ Power System. Es un sistema que aprovecha la gravedad para la circulación del agua en el interior de las tuberías que se encuentren en la ciudad, en donde se adaptan microturbinas que permiten generar electricidad. Estas son capaces de instalarse en serie para maximizar la generación. También son llamadas inteligentes, puesto que están acopladas a un sistema capaz de determinar el grado de contaminación o potabilidad que posea el agua. (Lucid Energy, 2007)

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy posee un elevado recurso hidráulico. Este no tiene un aprovechamiento óptimo, ya 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 efectuará en la Universidad de San Carlos de Guatemala, bajo las directrices de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería. El estudio se desarrollará 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. Esta 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 es fundamental 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 es necesario formular 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?

3. JUSTIFICACIÓN

Es necesario contribuir ante la sociedad planteando ideas innovadoras que apoyen al cambio de la matriz energética de Guatemala. Estos deben promover la generación de energía renovable para mejorar la calidad de vida en el país. Además aportar soluciones a las problemáticas existentes, razón por la cual es necesario determinar si la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy es capaz de generar una cantidad rentable de energía eléctrica como subproducto.

Además se justifica como un instrumento para sensibilizar a las autoridades. Se espera que con ayuda de esta investigación se puedan tomar consideraciones y evaluar el aprovechamiento del recurso hidráulico energético que en la actualidad se está desperdiciando en las plantas de tratamiento para la generación de energía eléctrica. Con esto se tendrían beneficios sociales, económicos, ambientales y políticos. Entre ellos contribuir a la buena imagen local, nacional e internacional con conciencia social, amigable con el medio ambiente buscando alternativas para el bienestar de la sociedad y el mundo entero. El fin es reducir el impacto de la huella de carbono sirviendo de modelo ante países latinoamericanos que poseen un superior nivel de desarrollo.

Asimismo energía eléctrica disponible que se genere con fuentes de energía renovable significa menos energía eléctrica producida con combustibles fósiles. Esto ayuda a la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), incluso podría favorecer en una disminución a la tarifa de energía eléctrica y reducción al coste del metro cúbico de agua potable a los vecinos de la ciudad.

El tema de investigación que muestra este documento se ajusta en la segunda y cuarta línea de investigación de la Maestría Energía y Ambiente. Esta corresponde a la “Gestión y Políticas Energéticas Ambientales” y “Diseño”, específicamente a los incisos 2.1, 2.2 y 4.1, siendo los siguientes:

- Formulación, gestión, seguimiento y evaluación de proyectos energéticos y ambientales: criterios de evaluación de proyectos, evaluación de proyectos de inversión, preparación, formulación y evaluación de un proyecto.
- Economía, política y planificación energética: alternativas de aprovechamiento energético, impactos económicos, financieros y ambientales, análisis de la matriz energética nacional.
- Diseño y operación de proyectos hidroeléctricos: impacto ambiental, estimación de procesos de erosión y sedimentación, aplicaciones en proyectos hidroeléctricos.

4. 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 económica como un generador distribuido renovable.

5. ALCANCES Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

El presente trabajo pretende exponer una descripción técnica y económica aprovechando la energía hidráulica generando energía eléctrica en la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy. La problemática indicada parte de su originalidad debido a que en la actualidad, en ninguna planta de tratamiento de agua potable en la ciudad de Guatemala se aprovecha el recurso de dicha energía hidráulica. Esto para producir como subproducto energía eléctrica, y poner a disposición agua potable y a su vez energía eléctrica de una fuente renovable. Con esto se satisfacen dos necesidades imprescindibles, que en el caso de la energía eléctrica puede servir para uso interno de la planta de tratamiento.

Si fuese posible generar una cantidad de energía eléctrica considerable esta se podría ofrecer al mercado eléctrico nacional o mercado eléctrico regional. Por ello se hace pertinente realizar la investigación y alcanzar el objetivo general, que consiste en estimar la capacidad de generación de energía eléctrica como subproducto de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Definición

La Generación Distribuida Renovable (GDR) es la forma en que se genera electricidad aplicando tecnologías que hagan uso de los recursos renovables. Estas son interconectadas a las redes de distribución en donde su participación de potencia neta no deberá superar los cinco megavatios 5 MW. (*Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía, 2014*)

En Guatemala, 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 participe en la actividad de GDR, siendo calificados como Participantes del Mercado Mayorista. (*Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía, 2014*)

6.2. 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.

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)

6.2.1. 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 dicho 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 y 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, 2015)

6.2.1.1. Hidroelectricidad

Es la energía que aprovechan los recursos hídricos en movimiento para producir electricidad. Se valen de la diferencia de alturas y del caudal que exista para ser enviado a una turbina hidráulica que utilizará la energía cinética del agua y la transformará en energía de rotación mecánica. Esta será transmitida al eje de un generador eléctrico para la producción de electricidad sin a su vez producir contaminación en el medio ambiente. Cabe mencionar que la subsistencia de esta energía dependerá del ciclo hidrológico. (Ministerio de Energía y Minas República de Guatemala, 2015)

6.2.1.2. Geotérmico

Esta energía es producida por el calor almacenado en los estratos geológicos que crean altas temperaturas. Estas son utilizadas para crear vapor, este es inyectado a una turbina de vapor interconectada al eje de un generador eléctrico. (Ministerio de Energía y Minas República de Guatemala, 2015)

6.2.1.3. Eólico

Es la energía producida por el viento que se crea por las diferentes intensidades de radiación solar en la tierra, que como reacción natural provoca

distintas temperaturas entre masas de aire desprendiendo un desplazamiento de las mismas. Creando anillos de circulación, transformando la energía cinética del aire al contacto con la pala del rotor en energía mecánica de rotación produciendo movimiento al eje de un generador eléctrico. (Ministerio de Energía y Minas República de Guatemala, 2015)

6.2.1.4. Solar

Esta energía es la que se genera por medio de la radiación aportada por el sol, que penetra en la atmósfera hasta llegar a la tierra. Este tipo de energía requiere de sistemas de almacenamiento, ya que la captación de radiación no es permanente. Es necesario el uso de celdas o células fotovoltaicas que reaccionan por el efecto fotoeléctrico absorbiendo fotones de luz y la celda fotovoltaica emite electrones, que al ser capturados se obtiene una corriente eléctrica, siendo ésta una alternativa utilizada para generar electricidad. (Ministerio de Energía y Minas República de Guatemala, 2015)

6.2.1.5. Biomásica

Es la energía que para su existencia hace uso de la materia orgánica procedente de árboles, ramas, aserrín, cortezas, plantas, desechos de animales. Estos incluyen residuos de la agricultura como maíz, café, arroz. Así también residuos urbanos como basura orgánica, aguas negras y lodos que pueden ser utilizados mediante procesamientos como quema directa o fermentación. Esto para la obtención de combustibles como el biogás o biocombustibles líquidos, para la producción de energía eléctrica. (Ministerio de Energía y Minas República de Guatemala, 2015)

6.2.2. 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)

6.3. Mecanismo del marco regulatorio

En Guatemala se ha mostrado interés por el desarrollo sostenible del país, por ello se presentará el aspecto legal específicamente los términos regulatorios para un (GDR).

6.3.1. 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, 1993)

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, 1993)

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, 1993)

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, 1993)

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, 1993)

6.3.2. 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)

6.3.3. 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 gozaran 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)

6.3.4. 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)

6.3.5. 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)

6.3.6. 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 (*Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía, 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. (*Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía, 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 (*Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía, 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. (*Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía, 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. (*Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía, 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. *(Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía, 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. *(Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía, 2014)*

Para complementar lo anteriormente mencionado se exhorta la lectura de la *Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoprodutores con Excedentes de Energía NTGDR*, este último no se menciona por no estar dentro del enfoque de este trabajo de graduación. *(Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía, 2014)*

6.4. 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. (*Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía, 2014*)

6.4.1. 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 Rioseco, 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.

(Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía, 2014)

6.4.2. Desventajas

La conexión de un GDR a la red del sistema de distribución en algunos casos también presenta implícitamente algunas desventajas.

(Mohr Rioseco, 2007)

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.
- Pérdida económica para la distribuidora al tener un usuario que inicialmente tiene un consumo, es decir recibía energía eléctrica posteriormente entregue energía a la red de distribución.
- Efectos en los voltajes en la red de distribución, como resultado de la conexión del GDR.
- 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.

(Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía, 2014)

6.5. Análisis técnico

Se describirán los elementos más significativos con lo que se determinará la magnitud de la capacidad generación en la central hidroeléctrica. Por medio de análisis matemáticos y estadísticos se predecirá el comportamiento a futuro.

6.5.1. Generalidades

Los elementos que principalmente constituyen una central hidroeléctrica son los que se mencionan a continuación:

- Turbina hidráulica
- Generador eléctrico

6.5.1.1. Turbina hidráulica

La palabra turbina viene del latín *turbo-inis*, que significa remolino. Es una máquina receptora que posee un mecanismo que recibe la energía de un fluido que al pasar a través de ella tiene la capacidad de transformarla en energía mecánica. Está constituida por álabes, hélices o paletas que están ubicadas en su circunferencia y en su centro posee un eje rotativo que puede transmitir esta energía mecánica a otra máquina con el objeto de generar movimiento para producir un trabajo útil, como la generación de electricidad en una central eléctrica. (Fajardo Ríos, 2009)

Las turbinas más importantes son las siguientes:

- Turbina Kaplan
- Turbina Pelton

- Turbina Francis
- Turbina Banki-Michell

(Fajardo Ríos, 2009).

6.5.1.1.1. Turbina Kaplan

Este tipo de turbina hidráulica es de las más eficientes de reacción, de flujo axial y de admisión total. Lleva el nombre del Doctor Víctor Kaplan (1876-1934). Esta turbina se caracteriza porque los álabes son ajustables y permite según las exigencias de caudal y de carga, se utiliza cuando la presión es baja y mediana. (Fajardo Ríos, 2009)

6.5.1.1.2. Turbina Pelton

Este tipo de turbina hidráulica puede ser de impulso o de acción. Lleva el nombre del ingeniero norteamericano Lester Allen Pelton (1829-1908). Esta turbina tiene la característica de utilizar únicamente la energía cinética del fluido, sin necesidad que exista un gradiente de presión entre la entrada y salida de la máquina hidráulica. El funcionamiento de la turbina Pelton puede ser eficiente cuando las condiciones del caudal son bajas y poseen altas caídas, puede trabajar entre el 20 % y 100 % del caudal máximo. La dirección en que el agua ejerce contacto con los álabes es de manera tangencial y operan a baja velocidad, lo cual dependerá de la construcción de los álabes, ya que estos permiten ser removidos para su reposición en caso de deterioro. (Fajardo Ríos, 2009)

6.5.1.1.3. Turbina Francis

Este tipo de turbina hidráulica puede ser de impulso y de flujo mixto, lleva el nombre del ingeniero inglés James Bichano Francis (1815-1892). Esta turbina

es considerada como la más utilizada a nivel mundial, puede trabajar bajo condiciones de carga de los 30 hasta 550 metros de altura, con caudales variables pocos metros cúbicos hasta 200 m³/s. Tiene la versatilidad de poder aprovechar la acción radial y axial del fluido en forma simultánea. (Fajardo Ríos, 2009)

6.5.1.1.4. Turbina Banki-Michell

Este tipo de turbina hidráulica es de flujo transversal, de admisión parcial y de doble efecto. Es desarrollada por el australiano Anthony Michell que la patentó en 1903. Posteriormente fue estudiada por el húngaro Donát Bánki en 1917. También es conocida como turbina de flujo cruzado, presenta buena eficiencia para caudales y caídas medias que no superen los 30 m por las dimensiones reducidas de su rodete. (Fajardo Ríos, 2009)

6.5.1.2. Generador eléctrico

Es una máquina rotativa que transforma energía mecánica transmitida a su eje en energía eléctrica de corriente alterna. Un generador eléctrico funciona con el principio de inducción electromagnética que descubrió el científico británico Michael Faraday en 1831. Él reveló que si un conductor de electricidad se mueve en un campo magnético, una corriente eléctrica fluirá por el conductor. (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009)

Es decir que la energía mecánica que realiza el alambre en movimiento se convierte en energía eléctrica. Estos pueden ser de corriente continua (dinamo) o corriente alterna (alternador) siendo el más usado hoy en día. (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009)

Existen dos tipos de generadores de corriente alterna, siendo los siguientes:

- Generador síncrono
- Generador asíncrono

(Fitzgerald, Kingsley, & Umans, 1992)

6.5.1.2.1. Generador síncrono

Puede ser llamado generador síncrono o sincrónico. En un generador sincrónico se aplica una corriente dc al devanado del rotor, la cual produce un campo magnético. Entonces el rotor del generador gira mediante un motor primario y produce un campo magnético rotacional dentro de la máquina. Este campo magnético rotacional induce un grupo trifásico de voltajes en los devanados del estator del generador (Chapman, 2012)

El generador síncrono es una máquina síncrona de corriente alterna cuya velocidad en régimen permanente es proporcional a la frecuencia de la corriente que alimenta su inducido. A la velocidad de sincronismo en el campo magnético giratorio creado por la corriente en el inducido gira a la misma velocidad que el creado por la corriente de excitación, resultando así un par constante.

(Fitzgerald, Kingsley, & Umans, 1992)

Dos términos muy utilizados para describir los devanados de una máquina son devanados de campo y devanados de armadura. En general, el término devanados de campo se aplica a los devanados que producen el campo magnético principal en la máquina, y el término devanados de armadura se aplica a los devanados donde se induce el voltaje principal. En las máquinas sincrónicas, los devanados de campo están sobre el rotor, de modo que los

términos devanados del rotor y devanados de campo y devanados de armadura. (Chapman, 2012)

En esencia, el rotor de un generador sincrónico es un gran electroimán. Los polos magnéticos del rotor pueden ser construidos salientes o no salientes. El término saliente significa proyectado hacia fuera o prominente; un polo saliente es un polo magnético que se proyecta hacia fuera de la superficie del rotor. Por otro lado, un polo no saliente es un polo magnético construido al mismo nivel de la superficie del rotor. (Chapman, 2012).

En los generadores síncronos es necesario alimentar el devanado del rotor con corriente continua, la cual origina un campo magnético giratorio en el interior del generador. Este a su vez, produce un sistema trifásico de voltajes en los arrollamientos del estator. Debido a que el rotor del generador gira es necesario utilizar mecanismos especiales para llevar a cabo el suministro de la corriente continua de excitación. Básicamente, la corriente continua puede ser suministrada por tres mecanismos de excitación: autoexcitación, excitación auxiliar y excitación sin escobillas. (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009)

La excitación auxiliar consiste en alimentar el devanado inductor mediante la corriente continua generada por una dinamo auxiliar regulada por un reóstato y montada sobre el árbol del generador sincrónico. (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009).

La autoexcitación consiste en tomar la corriente desde los terminales del generador, transformarla mediante un transformador de excitación, rectificarla mediante un sistema electrónico estático e inyectarla en el devanado inductor. Esto mediante un dispositivo de escobillas y anillos rozantes que rodean al

árbol de la máquina, pero aislados del mismo árbol. (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009).

6.5.1.2.2. Generador asíncrono

También conocido como generador de inducción. La mayor desventaja de los generadores asíncronos es que necesitan de una batería de condensadores conectada a la salida, la cual compense la energía reactiva generada. Para la creación del campo magnético el generador asíncrono debe estar conectado a la red y tomar de ella la corriente reactiva necesaria. Cuando la turbina hidráulica incrementa la potencia se produce un incremento en el deslizamiento. Ya que la red eléctrica es la que fija la frecuencia no se precisa que la turbina disponga de un regulador de velocidad. (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009).

Para llevar a cabo el arranque del generador asíncrono se actúa sobre la admisión de agua en la turbina. De tal manera que se vaya acelerando hasta que el generador se aproxime a su velocidad de sincronismo, instante en el que se cierra el interruptor automático de línea. (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009).

7. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

OBJETIVOS

Justificación

INTRODUCCIÓN

1. GENERACIÓN DISTRIBUIDA RENOVABLE EN GUATEMALA
 - 1.1. Definición
 - 1.2. Recurso energético primario
 - 1.3. Mecanismo del marco regulatorio
 - 1.4. Ventajas y desventajas para la distribuidora

2. ANÁLISIS TÉCNICO
 - 2.1. Generalidades
 - 2.2. Planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy
 - 2.2.1. Análisis de caudal de producción de la planta de tratamiento
 - 2.2.2. Potencial del recurso hidráulico
 - 2.3. Capacidad de generación de energía eléctrica
 - 2.3.1. Cálculo del potencial eléctrico
 - 2.3.2. Central hidroeléctrica
 - 2.3.3. Subestación eléctrica

3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Factibilidad económica de generación eléctrica con un generador distribuido renovable

3.1.1. Análisis de beneficio

3.1.2. Análisis de costo

3.1.3. Relación beneficio – costo

3.2. Presentación de resultados

3.3. Discusión de resultados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

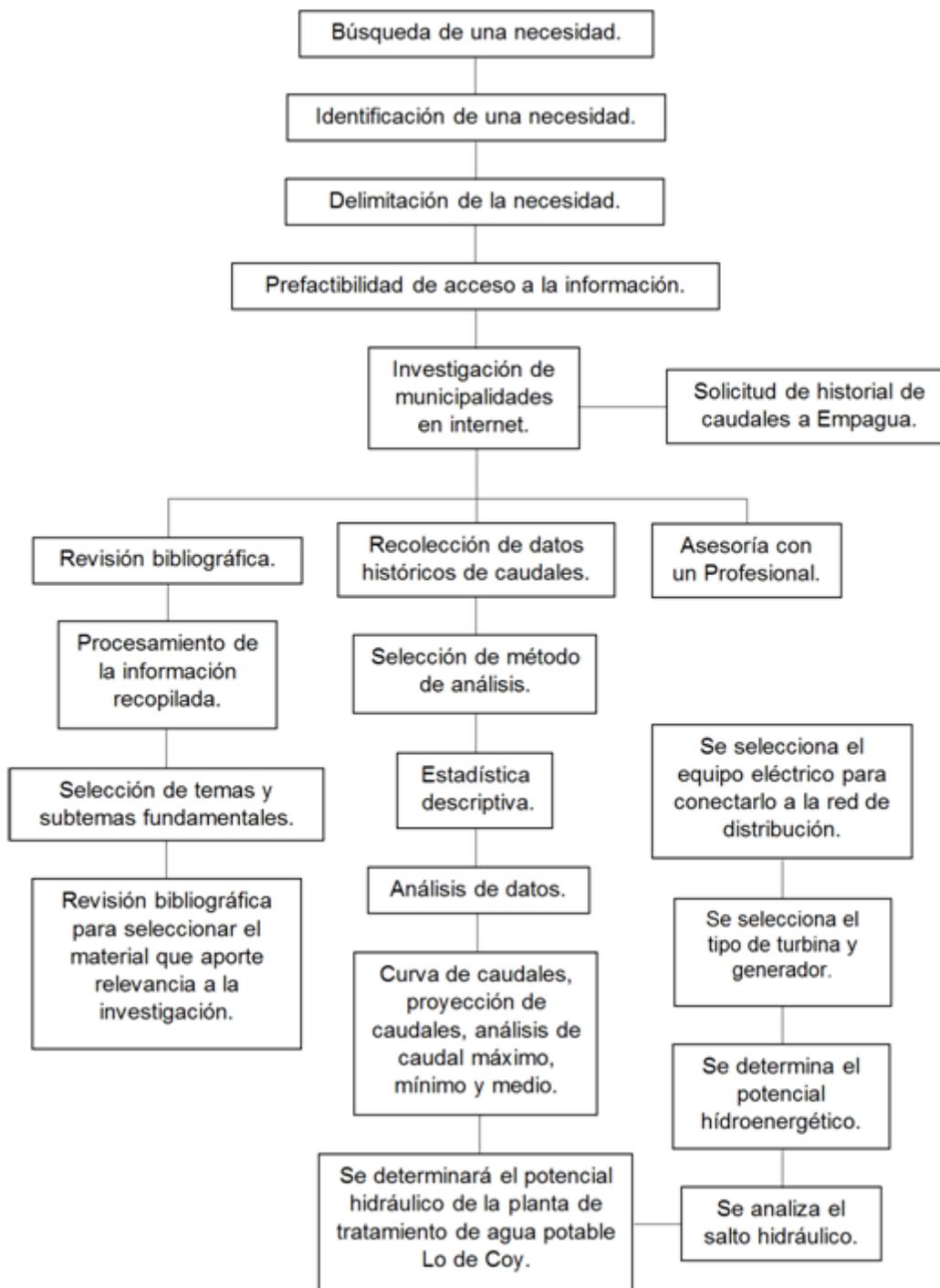
ANEXOS

8. METODOLOGÍA

La metodología adoptada tiene la finalidad de alcanzar los objetivos programados. Se diseñó en función de revisiones bibliográficas, investigaciones, consultas con profesionales en el campo de las hidroeléctricas. Se solicitó información y recopilaron datos para su procesamiento y análisis. Se realizó énfasis en el equipo fundamental para el buen funcionamiento de un generador distribuido renovable. Asimismo, se hace mención de un aspecto importante que es la regulación del subsector eléctrico de Guatemala.

En la revisión bibliográfica se seleccionaron los temas referentes a una central hidroeléctrica y los equipos que la constituyen hasta su conexión a la red de distribución, que comprende a las turbinas hidráulicas, generadores eléctricos, equipo de protección y control.

Figura 1. Metodología esquemática



Fuente: elaboración propia.

9. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

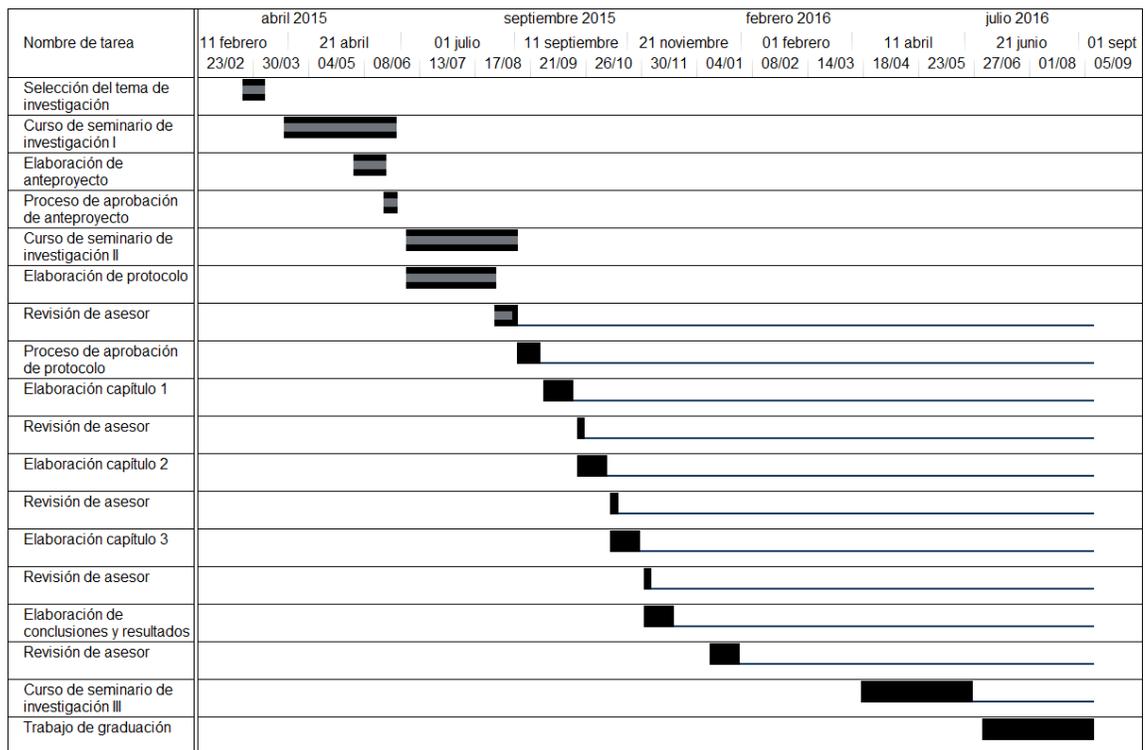
Para cumplir con los objetivos de esta investigación es necesario utilizar métodos teóricos, estadísticos y análisis numérico de ecuaciones. Los métodos teóricos y análisis numérico de ecuaciones son de naturaleza bibliográfica de documentos de tesis, trabajos de graduación, libros de texto, artículos científicos o normas que respalden las definiciones, teorías o leyes citadas en el mismo.

El análisis de los datos cuantitativos recopilados se utilizarán métodos de estadística descriptiva. Esto para determinar caudal mínimo, máximo y medio que demuestran los datos históricos que consisten en la producción mensual del 2000 al 2013 de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy. Se realizará una proyección de tendencia para predecir el ciclo hidrológico que presentara en 10 años. Se desarrollarán gráficas para demostrar las variaciones históricas del caudal de agua cruda, es decir se trazara la curva de caudales (Hidrograma). Con esto se identificará el caudal de diseño, basado en los resultados se hará uso de la carta de aplicación de turbinas hidráulicas, para seleccionar la que posea un mejor comportamiento en función del salto hidráulico y el caudal de diseño.

10. CRONOGRAMA

Para obtener un seguimiento ordenado, se integraron las actividades considerando el tiempo necesario para desarrollarla adecuadamente.

Figura 2. Diagrama de Gantt



Fuente: elaboración propia.

11. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

11.1. Recurso humano

- Entrevista al director de aguas superficiales de la Empresa Municipal de Agua (Empagua).
- Entrevista al subdirector de aguas superficiales de la Empresa Municipal de Agua (Empagua).

11.2. Recurso físico

Historial de producción mensual de la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy.

11.3. Recurso técnico

Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía NTGDR.

11.4. Recurso financiero

Se describen los recursos necesarios para llevar a cabo la presentación final del diseño de investigación. Dichos recursos serán autofinanciados por el autor del mismo.

Tabla I. **Recurso financiero**

Descripción	Subtotal
Alimentación	
• Almuerzo	Q 9 000,00
• Refacción	
Transporte	Q 4 500,00
Documentos impresos	Q 300,00
Uso de internet	Q 2 000,00
Consumo de energía eléctrica	Q 500,00
Medicamentos	Q 1 500,00
Actividades relacionadas al trabajo de graduación	Q 1 000,00
Gastos imprevistos	Q 1 500,00
Total	Q 20 300,00

Fuente: elaboración propia.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABALLÍ DE LEÓN RÉGIL, E. J. (Enero de 2014). Tesis Licenciatura en Ingeniería Eléctrica. *Propuesta de remodelación de subestacion Próceres, consistente en una subestación aislada en GAS SF6*. Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica. 140 p.
2. BARQUÍN GALVÁN, L. A. (Octubre de 2010). Trabajo de graduación de Maestría en Energía y Ambiente. *Generación de electricidad con aguas residuales del Rio Villalobos*. Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Estudios de Postgrado. 119 p.
3. BELJANSKY, M. (2012). *Matriz energetica: sus implicancias en la huella de carbono de productos*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. 117 p.
4. BOYLESTAD, R. L. (2004). Circuitos magnéticos. En R. L. Boylestad, *Introducción al análisis de circuitos*. México: Pearson Educación. 1 128 p.
5. CARTA GONZÁLEZ, J. A., CALERO PÉREZ, R., COLMENAR SANTOS, A., & CASTRO GIL, M. A. (2009). *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. Madrid: Pearson Educación, S.A. 703 p.

6. CHAPMAN, S. J. (2012). *Máquinas eléctricas*. México: McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A. de C.V. 768 p.
7. Constitución Política de la República de Guatemala. (17 de Noviembre de 1993). Guatemala, República de Guatemala. 76 p.
8. CÓRCOLES LÓPEZ, F., Pedra Duran, J., & Salichs Vivancos, M. (1996). *Transformadores*. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL. 215 p.
9. DÍAZ DE LA CRUZ, M. (Julio de 2009). Tesis Máster Oficial en el Sector Eléctrico. *Las energías renovables en el sistema eléctrico español*. Madrid: Universidad Pontificia Comillas, Escuela Técnica Superior de ingeniería. 246 p.
10. ENCINAS, M. P. (1976). *Turbomáquinas Hidráulicas*. México: Limusa. 261 p.
11. EPMAPS. (s.f.). *Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento - Quito*. [En línea] <<http://www.aguaquito.gob.ec/hidroelectricidad-1>> [Consulta: 18 de Mayo de 2015].
12. FAJARDO RÍOS, 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. FRAILE MORA, J. (2003). *Máquinas eléctricas*. España: 5a. Edición McGraw-Hill. 757 p.
15. GARCÍA PRADO, R. A. (Julio de 2008). Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente. *Caracterización energética de Guatemala*. Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Estudios de Postgrado. 128 p.
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 numero 93-96 Congreso de la República de Guatemala. Guatemala, República de Guatemala. 18 p.
18. Lucid Energy. (2007). *Lucid Energy*. [En línea] <www.lucidenergy.com> [Consulta: 15 de Abril de 2015].
19. Ministerio de Energía y Minas República de Guatemala. (20 de Agosto de 2015). *Recursos Enérgicos Renovables*. [En línea] <<http://www.mem.gob.gt/viceministerio-del-area-energetica-2/>>

energias-renovables/recursos-energeticos-renovables/> [Consulta: 22 de Junio de 2015].

20. MOHR RIOSECO, 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. 133 p.
21. Municipalidad de Guatemala. (s.f.). *Municipalidad de Guatemala*. [En línea] <<http://mu.muniguate.com/index.php/component/content/article/40-empagua/48-xayapixcayacoy>> [Consulta: 2015].
22. NIÑO MARTIN, D. (2013). *Fundación Dialnet*. [En línea] <<http://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=41596>> [Consulta: 13 de Junio de 2015].
23. Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoproductores con Excedentes de Energía. (25 de Agosto de 2014). Comisión Nacional de Energía Eléctrica. [En línea] <<http://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/Normas%20Tecnicas/08%20NTGDR.pdf>> [Consulta: 15 de Abril de 2015].
24. ORILLE FERNÁNDEZ, Á. L. (1993). Centrales hidroeléctricas. En *Centrales eléctricas*. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL. 208 p.
25. RAS OLIVA, E. (1991). *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. Barcelona: Marcombo, S.A. 283 p.

26. 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.
27. Reglamento de la Ley General de Electricidad. (21 de Marzo de 1997). Acuerdo Gubernativo Número 256-97. Guatemala, República de Guatemala. 64 p.
28. SANZ NOGUERA, V. (Octubre de 2013). *Microturbinas para generación eléctrica en redes de abastecimiento de agua potable de Cataluña*. Universitat Politècnica de Catalunya Barcelonatech. [En línea] <<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/19586>> [Consulta: 3 de Junio de 2015].

