



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO
ADMISIBLE DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA EN LA ZONA 10 DE LA
CIUDAD DE GUATEMALA**

Brayan Stid Ortíz Sosa

Asesorado por el MSc. Ing. Victor Manuel De León Contreras

Guatemala, abril de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO
ADMISIBLE DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA EN LA ZONA 10 DE LA
CIUDAD DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

BRAYAN STID ORTÍZ SOSA

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

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, ABRIL DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
SECRETARIA	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 PARA LA DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO
ADMISIBLE DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA EN LA ZONA 10 DE LA
CIUDAD DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 27 de mayo de 2020.

Brayan Stid Ortíz Sosa

Ref. EEPFI-577-2020
Guatemala, 27 de mayo de 2020

Director
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO ADMISIBLE DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA EN LA ZONA 10 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante **Brayan Stid Ortiz Sosa** carné número **201404162**, quien optó por 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 Artes en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

Y 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 Décimo, 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.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Victor Manuel De León Contreras
Asesor

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

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Área
Desarrollo Socio-Ambiental y Energético



Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





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 Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO ADMISIBLE DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA EN LA ZONA 10 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario Brayan Stid Ortiz Sosa, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

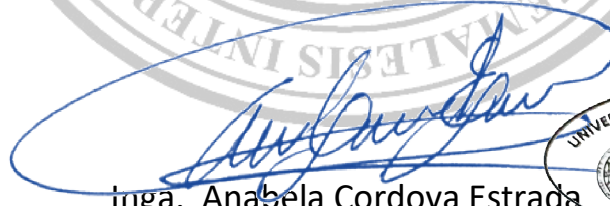


Guatemala, mayo de 2020

DTG. 181.2021.

La Decana 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 Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO ADMISIBLE DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA EN LA ZONA 10 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Brayan Stid Ortíz Sosa**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, abril de 2021.

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por permitirme alcanzar una meta más en mi vida.
- Mis padres** Avdias Raul Ortiz Morales y Mirna Elizabeth Sosa Agustín, por haberme dado la oportunidad de seguir este sueño. Gracias por ser fuente de amor, comprensión y motivación incondicional.
- Mi esposa** Por brindarme su apoyo, amor, comprensión y ayuda, para alcanzar todas las metas.
- Mis hermanos** Muchas gracias por su motivación, apoyo y cariño.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por todas las bendiciones en mi vida.
Mi familia	Por el cariño, consejos y apoyo incondicional.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios en donde tuve la oportunidad de formarme académicamente.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar este trabajo de graduación.
Mis amigos	Por los momentos de alegría, tristeza, dificultades y logros compartidos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
3.1. Contexto general	5
3.2. Descripción del problema	5
3.3. Formulación del problema	6
4. JUSTIFICACIÓN	7
5. OBJETIVOS.....	9
5.1. General.....	9
5.2. Específicos	9
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN.....	11
7. MARCO TEÓRICO.....	13
7.1. El subsector eléctrico en Guatemala	13
7.1.1. Estructura institucional	14

	7.1.1.1.	Ente rector	15
	7.1.1.2.	Ente regulador	15
	7.1.1.3.	Ente operador	16
7.1.2.		Marco regulatorio.....	17
	7.1.2.1.	Ley General de Electricidad	17
	7.1.2.2.	Reglamento de la Ley General de Electricidad	18
	7.1.2.3.	Reglamento del administrador del mercado mayorista	18
7.1.3.		Mercado mayorista	19
	7.1.3.1.	Modelo de mercado	19
	7.1.3.2.	Participantes del mercado mayorista ...	20
		7.1.3.2.1. Generador	20
		7.1.3.2.2. Transportista.....	21
		7.1.3.2.3. Distribuidor	21
		7.1.3.2.4. Comercializador.....	22
		7.1.3.2.5. Grandes usuarios	23
7.1.4.		Demanda de electricidad en Guatemala	23
7.1.5.		Potencia instalada en el parque generador a nivel nacional.....	24
7.2.		Generación distribuida renovable en Guatemala.....	25
	7.2.1.	Tecnologías para la generación distribuida renovable	27
		7.2.1.1. Biomasa.....	27
		7.2.1.2. Eólica.....	28
		7.2.1.3. Geotérmica	29
		7.2.1.4. Hidráulica.....	29
		7.2.1.5. Solar fotovoltaica	29

	7.2.1.5.1.	Principio de generación fotovoltaica	31
	7.2.1.5.2.	Componentes de un sistema eléctrico fotovoltaico	33
7.2.2.		Norma técnica para la conexión, operación, control y comercialización de la generación distribuida renovable NTGDR	34
7.2.3.		Norma técnica del servicio de distribución NTSD	36
7.2.4.		Potencia instalada de generación distribuida renovable	36
7.2.5.		Potencial de Guatemala para la instalación de energías renovables	38
7.3.		Redes de distribución radiales	39
	7.3.1.	Características de una red de distribución radial	40
	7.3.2.	Redes de distribución radiales sin generación distribuida	40
	7.3.3.	Redes de distribución con generación distribuida fotovoltaica.....	41
	7.3.4.	Parámetros eléctricos de la red de distribución	41
		7.3.4.1. Regulación de tensión.....	42
		7.3.4.2. Nivel de cortocircuito	42
		7.3.4.3. Flujo de potencia.....	43
		7.3.4.4. Coordinación de protecciones eléctricas	43
		7.3.4.5. Continuidad del servicio eléctrico	43
		7.3.4.6. Pérdidas de energía eléctrica	44
7.3.5.		Criterios para determinación de un porcentaje óptimo de generación distribuida	44

8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	47
9.	METODOLOGÍA	51
9.1.	Diseño de la investigación	51
9.2.	Tipo de estudio.....	51
9.3.	Alcance de la investigación	52
9.4.	Unidades de análisis	52
9.4.1.	Variables	52
9.5.	Fases del estudio	55
9.5.1.	Fase 1: revisión documental.....	55
9.5.2.	Fase 2: determinación de los potenciales generadores distribuidos fotovoltaicos.....	56
9.5.3.	Fase 3: determinación de los efectos de la generación distribuida a las empresas de distribución	56
9.5.4.	Fase 4: análisis de los parámetros eléctricos de la red de distribución sin generación distribuida	56
9.5.5.	Fase 5: análisis de los parámetros eléctricos de la red de distribución con generación distribuida fotovoltaica	57
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	59
10.1.	Análisis univariado	59
10.2.	Análisis bivariado	61
10.3.	Análisis matemático	62
11.	CRONOGRAMA	65
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	67

13. REFERENCIAS.....69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estructura institucional	15
2.	Evolución del marco regulatorio del subsector eléctrico	17
3.	Modelo del mercado eléctrico nacional	20
4.	Demanda de potencia mensual 2018	24
5.	Capacidad instalada y efectiva del parque generador de Guatemala	25
6.	Mapa de potencial solar en Guatemala	30
7.	Efecto fotoeléctrico en una célula solar	32
8.	Diagrama de bloque de un sistema fotovoltaico	34
9.	MW capacidad efectiva	37
10.	MW capacidad efectiva acumulada	38
11.	Esquema de distribución radial	39
12.	Subdivisiones del área de estudio según la radiación solar.....	60
13.	Distribución de baja, media y alta radiación solar en edificios	62
14.	Diagrama Gantt.....	65

TABLAS

I.	Variables de estudio.....	53
II.	Clasificación de variables.....	54
III.	Presupuesto para elaboración del trabajo de investigación.....	68

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CO₂	Dióxido de carbono
E	Energía
°	Grados
Hz	Hercio
Km	Kilómetro
kW	Kilovatio
KWH/m²/día	Kilovatio hora por metro cuadrado al día
kV	Kilovoltio
MW	Megavatio
m/s	Metros por segundo
%	Porcentaje
P	Potencia
W	Vatio
V	Voltio

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
Armónicos	Frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental.
BID	Banco Interamericano de Desarrollo.
Biodegradable	Sustancia que se descompone en los elementos químicos que lo conforman.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
Flicker	Disturbio en la amplitud de la onda de tensión.
GD	Generación distribuida.
GDR	Generación distribuida renovable.
MEM	Ministerio de Energía y Minas.
MM	Mercado Mayorista.
MPPT	Tecnología que rastrea el punto de máxima potencia.

NTGDR	Norma técnica para la conexión, operación, control y comercialización de la generación distribuida renovable.
NTSD	Norma técnica del servicio de distribución.
Silvicultura	Actividades relacionadas con el cultivo, cuidado y explotación de los bosques.
Voltímetro	Instrumento para medición de los voltios.

RESUMEN

El uso de tecnologías no convencionales para la generación de electricidad es de gran contribución en la reducción de gases contaminantes que provocan cambios en los ecosistemas. Actualmente en Guatemala se promueve la generación distribuida renovable, lo cual consiste en la instalación de plantas generadoras no mayores a 5 MW en las grandes ciudades o cerca de los centros de consumo. Este tipo de generación de electricidad aporta beneficios económicos, sociales y medio ambientales.

En Guatemala los proyectos de generación distribuida están regulados y basados en la norma técnica para la conexión, operación, control y comercialización de la generación distribuida renovable emitida por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Esta norma detalla las obligaciones y derechos de los generadores distribuidos renovables y de las empresas distribuidoras.

El presente diseño de investigación tiene como finalidad establecer los lineamientos para determinar cuanta generación distribuida fotovoltaica es beneficiosa para la zona 10 de la ciudad de Guatemala, mediante el análisis de los impactos económicos y técnicos que este tipo de generación causa en la empresa de distribución. Esto por medio de la obtención de datos que permitan modelar la red de distribución del área en estudio para analizar el comportamiento de los parámetros eléctricos y así determinar el porcentaje óptimo de generación distribuida fotovoltaica que los mantenga entre los límites establecidos por el ente regulador.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de energía eléctrica a partir de recursos fósiles se considera una de las principales fuentes contaminantes debido a la emisión de gases de efecto invernadero y CO₂. Además, la creciente demanda de energía eléctrica en el país ha permitido la introducción de tecnologías no convencionales para la producción de electricidad a partir de recursos naturales renovables. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías no convencionales conlleva desafíos para mantener la seguridad energética en el país.

El desarrollo de tecnologías para la generación fotovoltaica y eólica ha permitido su adecuada introducción a la matriz energética de Guatemala. Actualmente, se estima que la instalación de este tipo de centrales aumentará en los siguientes años en el territorio nacional.

Las instituciones encargadas del adecuado funcionamiento del mercado eléctrico nacional han promovido la generación distribuida renovable conectada a las redes de distribución, con la finalidad de mejorar el servicio de electricidad, depender menos de los combustibles fósiles y contribuir a la seguridad energética en el país.

El proceso para la generación de energía eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos. Inicialmente, debe ser estudiado por medio de conceptos teóricos de las variables que intervienen o influyen durante el proceso de producción. Se debe realizar un análisis previo y posterior a la conexión de generadores distribuidos fotovoltaicos en la red de distribución y con esto determinar la influencia de la generación distribuida fotovoltaica en el comportamiento de

parámetros eléctricos como la regulación de tensión, flujo de potencia y nivel de cortocircuito.

La determinación del adecuado porcentaje de generación distribuida fotovoltaica en la red de distribución de la zona 10 de Guatemala. Se realizará por medio de un estudio que marque las pautas necesarias para el adecuado aprovechamiento del recurso solar con el que cuenta el país.

2. ANTECEDENTES

De acuerdo con los estudios realizados por Bae, Kim, Kim y Singh (2004) exponen un procedimiento para determinar el funcionamiento adecuado de la generación distribuida renovable. Se incorpora la fiabilidad para la evolución de los sistemas de distribución de las ciudades. En la actualidad, el costo de la electricidad varía de forma horaria, según los generadores despachados para cobertura de la demanda. La generación distribuida puede ser de gran beneficio para las empresas de distribución en periodos de alta demanda.

En el trabajo de tesis realizado por Royo (2010) se realiza un análisis económico de la integración de generación distribuida en las empresas eléctricas distribuidoras. Este análisis indica que el incremento de conexiones de generación distribuida crea una serie de costos o beneficios sobre las distribuidoras, como es el caso del aumento o disminución de pérdidas, necesidad de reforzar las capacidades de las líneas de distribución o la necesidad de analizar la red de forma distinta a la radial. Así mismo, se debe tener en cuenta que la integración de generación distribuida requiere una serie de modificaciones de naturaleza técnica y regulatoria.

En estudios realizados por Grisales, Restrepo y Jaramillo (2017) se presentan las consideraciones que deben ser tomadas al momento de analizar, modelar y solucionar el problema de la incorporación de generación distribuida renovable. Se enfoca en la descripción del sistema de distribución eléctrica, enfatizando la modelación de las cargas eléctricas conectadas cerca del nodo de interés para la conexión de la generación distribuida renovable.

De acuerdo al artículo científico redactado por Escobar, Hincapie y Torres (2009) se analiza la conexión de los sistemas de generación fotovoltaicos a los sistemas de distribución, indicando que la forma de conectar los paneles fotovoltaicos depende de la potencia que se desea suministrar a la red. Es posible realizar su conexión en serie, paralelo o de forma combinada. Así mismo, se hace mención que un sistema generador fotovoltaico requiere inversores eléctricos, cuya función es oscilar la corriente continua generada, para ser inyectada al sistema de distribución en forma alterna.

En el trabajo de investigación realizado por Hernández y Medina (2006) se analiza el impacto en el suministro eléctrico causado por la implementación de plantas generadoras fotovoltaica en redes de distribución. Evalúan parámetros como la seguridad energética, interrupciones y la forma de onda de corriente y voltaje en la red. Con respecto a las distorsiones de señal provocada por armónicos (múltiplos de la frecuencia fundamental de 60 Hz) afirman que la distorsión armónica es similar en todo momento y de baja influencia sobre la calidad del suministro gracias a los avances de la electrónica de potencia de hoy en día.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Contexto general

En la actualidad los gobiernos e instituciones internacionales promueven la descentralización de la generación de energía eléctrica a base de recursos naturales, con el fin de reducir los niveles de contaminación ocasionados por la producción de energía eléctrica por medio de recursos fósiles.

Gracias a las iniciativas internacionales, la generación distribuida renovable ha tenido una gran aceptación a nivel social, ya que son energías limpias cerca de los centros de consumo. Se logra una reducción de gases de efecto invernadero y emisiones de CO₂.

Debido a la investigación y desarrollo de su tecnología, la generación fotovoltaica es la de mayor auge en la actualidad. Se ha aumentado drásticamente la instalación de estas plantas generadoras de pequeña escala conectadas a las redes de distribución. Con esto, en las redes de distribución existen desafíos, como por ejemplo cuando esta generación es máxima o mínima.

3.2. Descripción del problema

Dada la variabilidad climática de la cual depende este tipo de tecnología, los generadores distribuidos fotovoltaicos dejan de generar electricidad de un momento a otro, obligando a las distribuidoras a suministrar la energía faltante para cobertura de toda la demanda.

La coordinación de protecciones de la red de distribución también se ve afectada por el ingreso de la generación distribuida fotovoltaica debido a dos razones, por un lado, en momentos de alta generación fotovoltaica, el flujo de potencia puede cambiar de dirección obteniendo así flujos bidireccionales a lo largo del tiempo; mientras que, al existir generación de electricidad conectada directamente a la red de media tensión, el nivel de corto circuito aumenta, afectando de igual manera la coordinación de protecciones eléctricas.

3.3. Formulación del problema

- **Pregunta central**

¿Cuál es el porcentaje de generación distribuida fotovoltaica en la red de distribución de la zona 10, de la ciudad de Guatemala, que mantenga los parámetros eléctricos dentro de los límites permitidos para la empresa distribuidora?

- **Preguntas auxiliares**

- ¿Quiénes son los potenciales generadores distribuidos fotovoltaicos para Guatemala?
- ¿Cuál es la influencia de la generación distribuida renovable en las empresas distribuidoras?
- ¿Cómo es el comportamiento de los parámetros eléctricos en una red de distribución sin generación distribuida fotovoltaica?
- ¿Cómo influye la generación distribuida fotovoltaica en los parámetros eléctricos de la red de distribución de la zona 10?

4. JUSTIFICACIÓN

El trabajo se introduce en la línea de investigación de generación distribuida y redes inteligentes del área de investigación gestión de sistemas de distribución eléctrica de la Maestría Gestión de Mercados Eléctricos Regulados, con criterio de relevancia social.

Se abordan temas importantes debido al impacto directo que tiene la generación distribuida fotovoltaica en las redes de distribución, industrias y usuarios regulados, como el impacto en parámetros eléctricos, la descontaminación por medio de la utilización de recursos naturales, el impacto en la seguridad energética y las modificaciones en las redes de distribución.

La introducción de las energías renovables ha tenido un gran éxito en las últimas décadas. En los últimos años, la instalación de centrales solares ha aumentado drásticamente en todo el territorio nacional, gracias a las luchas contra la contaminación, avances tecnológicos, reducción del precio de la electricidad y al potencial solar con el que cuenta Guatemala.

Debido al gran éxito de las energías renovables intermitentes, es necesario evaluar hasta qué porcentaje de la demanda de una red de distribución puede cubrir la generación distribuida fotovoltaica. Estas conllevan a modificaciones, ampliaciones e inversiones en las redes de media y baja tensión. Todo esto bajo la premisa de que la energía eléctrica no se puede almacenar en grandes cantidades de forma económicamente viable.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Determinar el porcentaje óptimo de generación distribuida fotovoltaica que contribuya a la eficiencia de los parámetros eléctricos en la red de distribución de la zona 10 de la ciudad de Guatemala.

5.2. Específicos

- Determinar los potenciales generadores distribuidos fotovoltaicos para Guatemala.
- Identificar los efectos a las empresas distribuidoras causados por la generación distribuida renovable.
- Analizar los parámetros eléctricos de la red de distribución actual de la zona 10 de la ciudad de Guatemala.
- Determinar la influencia de la generación distribuida fotovoltaica en la red de distribución de la zona 10 de la ciudad de Guatemala.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN

La escasez de estudios acerca de cuanta debe de ser la máxima generación fotovoltaica conectada a las redes de distribución es un obstáculo para promover la inversión en este tipo de proyectos a nivel nacional.

El desarrollo adecuado de este tipo de estudios puede contribuir a efectos del tipo:

- **Económico:** esto debido a que el precio de la electricidad experimenta reducciones cuando las tecnologías no convencionales se introducen en la matriz energética de los países.
- **Seguridad energética:** la seguridad energética del país se puede ver beneficiada con la implementación de este tipo de tecnologías para la producción de electricidad.
- **Ambiental:** la utilización de recursos naturales contribuye con las luchas contra la contaminación del país y el planeta.

Se determinará el potencial de generación distribuida fotovoltaica y los posibles puntos de conexión en la red de distribución, tomando en consideración las limitantes de las redes actuales que fueron diseñadas sin la contemplación de la generación distribuida renovable. La finalidad es determinar hasta qué punto la introducción de estas tecnologías son de beneficio para los usuarios finales del servicio eléctrico en el país.

7. MARCO TEÓRICO

Se presentan las bases del tema de investigación, iniciando con las generalidades del subsector eléctrico de Guatemala. Posteriormente, se analizan los recursos naturales que pueden utilizarse para generación eléctrica, finalizando con los conceptos de los parámetros eléctricos a estudiar y como son impactados por la generación distribuida fotovoltaica.

7.1. El subsector eléctrico en Guatemala

El Ministerio de Energía y Minas (2019) afirma “en Guatemala, el sector energético lo conforman los subsectores eléctrico e hidrocarburos” (p.1). Los servicios de electricidad están regulados y basados en un marco regulatorio basado en la Ley General de Electricidad y su reglamento, cuyas emisiones fueron en 1996 y 1997 respectivamente, ambos bajo la presidencia de Álvaro Arzú.

El subsector eléctrico de Guatemala cuenta con participación estatal y privada, por tal razón debe ser analizado para definir las entidades encargadas del correcto funcionamiento del subsector, los participantes del mercado, el modelo eléctrico bajo el que interactúan y el marco regulatorio sobre el que está estructurado. Para afrontar el constante crecimiento del consumo de electricidad (su comportamiento y métodos para su abastecimiento), analizando el parque generador del país para la determinación de la oferta disponible.

De acuerdo con el Ministerio de Energía y Minas (2017), el sistema eléctrico es la infraestructura física que permite el suministro de electricidad, esta se divide

en el sistema de generación (plantas generadoras de electricidad de distintas tecnologías como térmica, hidráulica, fotovoltaica, eólica, biomasa, geotérmica, carbón, bunker o diésel); sistema de transporte (líneas y subestaciones eléctricas que permiten el flujo de potencia desde las plantas generadoras hacia los centros de consumo); sistema de distribución (líneas y subestaciones eléctricas que tienen contacto directo con los consumidores finales).

La Ley General de Electricidad fue emitida, según Gómez (2016), con el objetivo de eliminar las deficiencias en el subsector eléctrico y así lograr la atracción de inversionistas (para obtener una mayor oferta de energía), promoviendo la libre competencia para las distintas actividades, teniendo como base la eficiencia y la mejora en los precios para los consumidores del servicio eléctrico.

7.1.1. Estructura institucional

Con la Ley General de Electricidad, según el Banco Interamericano de Desarrollo (2004) se estableció, “un mercado mayorista de energía conformado por un mercado de contratos bilaterales a término y transacciones a corto plazo de potencia y energía en un mercado de oportunidad y separación de actividades de generación, transmisión y distribución” (p. 6).

Así mismo, se estableció la separación de las entidades del subsector eléctrico como el Ministerio de Energía y Minas, Comisión Nacional de Energía Eléctrica y el administrador del mercado mayorista.

Figura 1. **Estructura institucional**



Fuente: elaboración propia.

7.1.1.1. Ente rector

El Ministerio de Energía y Minas es el ente encargado del sector energético de Guatemala, cuya creación fue en 1983. En la Ley General de Electricidad (1996, art.3) se denomina al Ministerio de Energía y Minias como un “órgano del Estado responsable de formular y coordinar las políticas, planes de Estado, programas indicativos relativos al subsector eléctrico y aplicar esta ley y su reglamento para dar cumplimiento a sus obligaciones” (p. 4).

Además, según el Banco Interamericano de Desarrollo (2013) algunas de sus funciones son “proponer y cumplir las normas ambientales en materia energética y ejercer las funciones normativas y de control y supervisión en materia de energía eléctrica que le asignen las leyes” (p. 21).

7.1.1.2. Ente regulador

En la Ley General de Electricidad se establece a la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, como un órgano técnico del Ministerio, cuyo mandato es

regular el subsector eléctrico. La Comisión Nacional de Energía Eléctrica fue creada en 1996 a partir de la la Ley General de Electricidad.

En la Ley General de Electricidad el Congreso de la República de Guatemala (1996) menciona sus funciones:

Cumplir y hacer cumplir la presente ley y sus reglamentos, en materia de su competencia, e imponer las sanciones a los infractores, definir las tarifas de transmisión y distribución, sujetas a regulación de acuerdo a la presente ley, así como la metodología para el cálculo de las mismas, emitir las normas técnicas relativas al subsector eléctrico y fiscalizar su cumplimiento en congruencia con prácticas internacionales aceptadas. (p. 4)

7.1.1.3. Ente operador

En la Ley General de Electricidad el Congreso de la República de Guatemala (1996) indica “la administración del mercado mayorista estará a cargo de un ente privado, sin fines de lucro, denominado administrador del mercado mayorista” (p. 12).

Según la Ley General de Electricidad (1996, art.44) entre sus funciones está la seguridad y el abastecimiento de energía eléctrica. El administrador del mercado mayorista verifica que las inyecciones de generación sean acorde a la energía demandada, con el objetivo de mantener la estabilidad del sistema eléctrico.

7.1.2. Marco regulatorio

La regulación del subsector eléctrico en Guatemala marca las disposiciones técnicas, administrativas, ambientales y sociales para la participación en las actividades eléctricas.

Según el BID la regulación del subsector eléctrico (2013), tuvo inicio con la Ley General de Electricidad con el proposito de cambiar el modelo eléctrico que contaba con gran participación estatal, buscando así la desmonopolización del subsector, con la finalidad de atraer a nuevos inversionistas.

Seguidamente de la Ley General de Electricidad se emitieron: el reglamento de la ley general de electricidad, el reglamento del administrador del mercado mayorista, normas técnicas, normas comerciales, normas operativas, esto con el proposito de seguir regulando el subsector eléctrico.

Figura 2. **Evolución del marco regulatorio del subsector eléctrico**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Power Point.

7.1.2.1. Ley General de Electricidad

El mercado eléctrico guatemalteco experimentó un gran desarrollo desde la vigencia de la Ley General de Electricidad promoviendo la competencia en las

actividades eléctricas del país (generación, transmisión y distribución). La liberación del mercado eléctrico trajo la necesidad de crear instituciones que velaran el cumplimiento de los estatutos establecidos en el marco regulatorio.

Algunos de los mandatos establecidos en la Ley General de Electricidad, citada por el Banco Interamericano de Desarrollo (2004) son “libertad de entrada a las actividades de generación, transmisión y distribución bajo un esquema de autorizaciones con áreas no exclusivas, separación de actividades de generación, transmisión y distribución, libertad de precios para grandes usuarios (demanda superior a 100 kW)” (p. 6).

7.1.2.2. Reglamento de la Ley General de Electricidad

El reglamento de la Ley General de Electricidad detalla los procedimientos, metodologías, mecanismos, establecimiento de las tarifas, cargos, multas, estudios y las demás acciones que se lleven a cabo dentro del subsector eléctrico, siendo este reglamento un detalle de la Ley General de Electricidad.

En el reglamento de la Ley General de Electricidad, emitido en 1997, se designa al regulador establecer los alcances y modificaciones para la integración e instalación correcta de las plantas generadoras menores a 5 MW conectadas a las redes de distribución.

7.1.2.3. Reglamento del administrador del mercado mayorista

El reglamento del administrador del mercado mayorista fue emitido para establecer los lineamientos a seguir en el mercado mayorista, teniendo en

consideración que el administrador del mercado mayorista es el encargado del abastecimiento de electricidad.

Este reglamento, emitido en 1998, establece las pautas para operar en el mercado mayorista bajo las modalidades de generador, transmisor, distribuidor, comercializador, importador o exportador de electricidad, con la finalidad de apoyar el crecimiento y desarrollo del subsector eléctrico.

7.1.3. Mercado mayorista

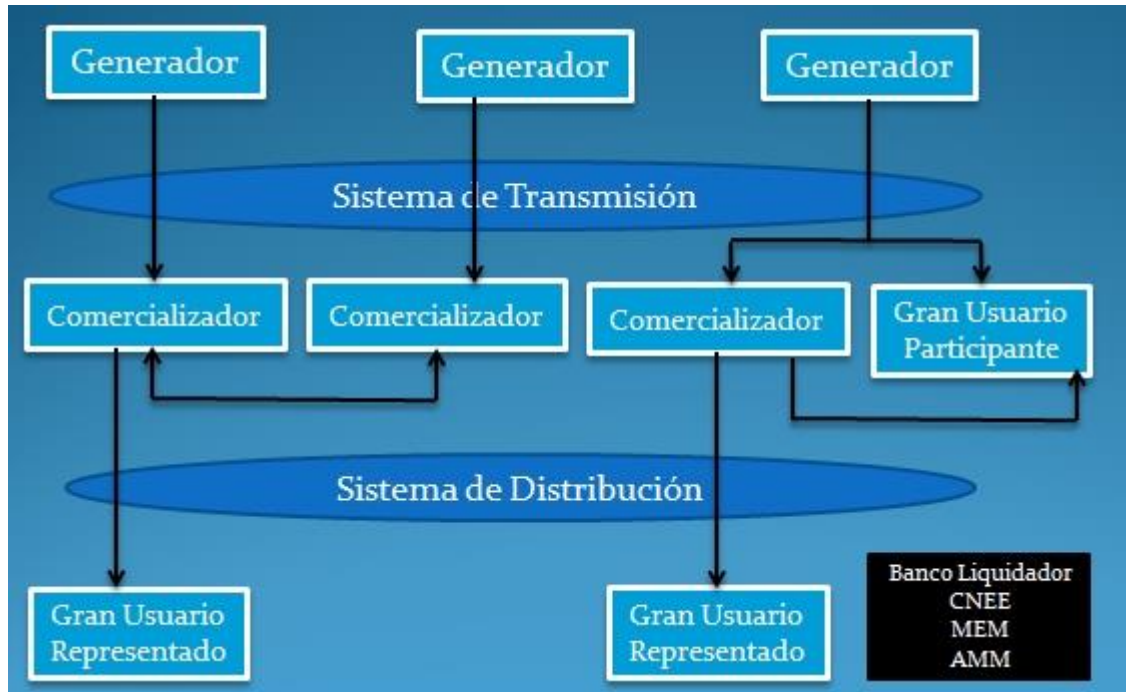
Según la Ley General de Electricidad, en su capítulo de definiciones (1996, art.6), el mercado mayorista “el conjunto de operaciones de compra y venta de bloques de potencia y energía que se efectúan a corto y a largo plazo entre agentes del mercado” (p. 5).

7.1.3.1. Modelo de mercado

Los agentes y grandes usuarios interactúan en el mercado mayorista para realizar los intercambios de electricidad en el país. Esta interacción se lleva a cabo bajo las condiciones de libertad, competencia y sin privilegio alguno, independientemente si sea entidad privada o pública. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2015)

Las distribuidoras pueden realizar compras de electricidad solamente a generadores. Los grandes usuarios pueden comprar electricidad a un generador, distribuidor o comercializador. Los comercializadores pueden negociar con generadores, grandes usuarios y con otro comercializador.

Figura 3. **Modelo del mercado eléctrico nacional**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Power Point.

7.1.3.2. **Participantes del mercado mayorista**

Los participantes del mercado mayorista interactúan entre ellos comprando y vendiendo electricidad en forma de potencia y energía.

7.1.3.2.1. **Generador**

Los generadores son el primer eslabón en la cadena para el servicio de electricidad. Producen electricidad por medio de los distintos tipos de tecnología que se encuentran instaladas.

En la actualidad, según la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2019), entre los combustibles empleados para la producción eléctrica están diesel, bunker, carbón, biogas, biomasa, solar, hídrica, eólica y geotérmica.

7.1.3.2.2. Transportista

Los transportistas de energía eléctrica son aquellos que poseen subestaciones eléctricas, líneas, derechos de paso, protecciones eléctricas y torres de transmisión, con la finalidad de transmitir la electricidad desde las plantas generadoras hacia las grandes ciudades.

Los activos de los transportistas forman el denominado sistema de transmisión. Según lo indicado en la Ley General de Electricidad por el Congreso de la República de Guatemala (1996), el sistema de transmisión comprende “un sistema principal y sistemas secundarios” (p.6). Por estos activos los transportistas devengan un pago por su uso.

Según lo indicado por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2015), los transportistas eléctricos “operan básicamente en cuatro niveles de voltaje: 400kV, 230kV, 138kV y 69kV” (p. 36).

7.1.3.2.3. Distribuidor

Es el último eslabón de la cadena, el cual está conformado por subestaciones y líneas eléctricas a una tensión menor de 34.5 kV. Un distribuidor eléctrico es aquel que tiene contacto directo con los usuarios finales de energía eléctrica.

A nivel nacional las distribuidoras principales según la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2015) son las siguientes:

- Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A. (EEGSA), región central (Guatemala, Escuintla y Sacatepéquez).
- Distribuidora de Electricidad de Occidente, S. A. (DEOCSA), región nort-suroccidente.
- Distribuidora de Electricidad de Oriente, S. A. (DEORSA), región Norte-Suroriente.
- Empresas Eléctricas Municipales. (EEM), algunas cabeceras departamentales.

Las áreas del país están divididas para la operación de las distintas distribuidoras eléctricas, ya que se considera un monopolio natural. No es económicamente factible que dos empresas distribuidoras operen en una misma área geográfica, esto implica doble inversión (doble infraestructura eléctrica).

En la Ley General de Electricidad (1996) se estipula que, para ser considerado como un distribuidor, este debe tener como mínimo 15,000 usuarios (esto no es aplicable a empresas eléctricas municipales).

7.1.3.2.4. Comercializador

En la Ley General de Electricidad, en su capítulo de definiciones y su artículo 6 el Congreso de la República de Guatemala (1996), define al comercializador como “la persona, individual o jurídica, cuya actividad consiste en comprar y vender bloques de energía eléctrica con carácter de intermediación y sin participación en la generación, transporte, distribución y consumo” (p. 5).

La característica principal de un comercializador eléctrico (como lo menciona la Ley General de Electricidad) es que no tiene participación directa en las actividades del suministro eléctrico, ejerce únicamente como un intermediario o un representante de otros agentes en el mercado mayorista.

7.1.3.2.5. Grandes usuarios

Los grandes usuarios pueden inscribirse en el mercado mayorista si su consumo según el Banco Interamericano de Desarrollo (2004) es mayor a 100 kW con lo cual pueden reducir sus pagos por el suministro de electricidad, ya que pueden negociar con generadores, comercializadores o distribuidores.

Los grandes usuarios pueden ejercer con la figura de representados (es decir, los representa un comercializador en el mercado mayorista) y como participante (participa directamente en el mercado mayorista).

7.1.4. Demanda de electricidad en Guatemala

La cantidad de electricidad consumida en un país es proporcional al número de habitantes de dicho país. Se puede afirmar que la energía eléctrica consumida en Guatemala aumenta constantemente.

Las estadísticas del 2018 emitidas por el Ministerio de Energía y Minas (2019), muestran una demanda de potencia anual igual a 20,542.5 MW, siendo marzo el mes de mayor demanda con 1762.5 MW.

Figura 4. **Demanda de potencia mensual 2018**



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2019). *Estadísticas subsector eléctrico 2018*.

Consulta: 13 de febrero de 2020. Recuperado de <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2019/01/Estad%C3%ADsticas-Su-bsector-El%C3%A9ctrico-1.pdf>

7.1.5. Potencia instalada en el parque generador a nivel nacional

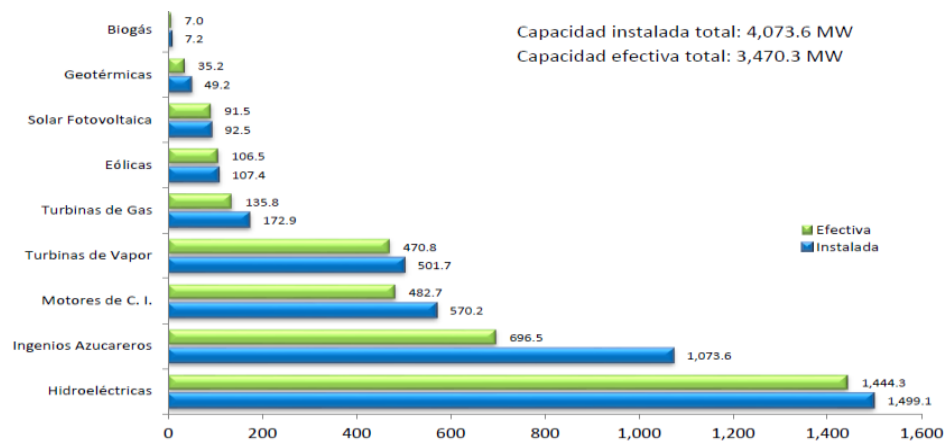
La potencia instalada es la capacidad con la que cuenta el país para el suministro de electricidad. Esta potencia instalada se divide en propiedad privada y estatal, así mismo, se puede dividir por el tipo de combustible que utiliza, siendo la de mayor uso la tecnología hidroeléctrica.

Guatemala, en los últimos años, ha aumentado su potencia instalada a base de recursos renovables, logrando una reducción de precios por el suministro eléctrico, diversificación en la matriz energética y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. Este aumento de generación renovable ha sido beneficiado por la implementación de generadores distribuidos renovables conectados a las redes de distribución.

Es importante destacar que la potencia instalada difiere de la potencia efectiva con la que se cuenta, esto debido a que las plantas generadoras

experimentan modificaciones. A continuación, se presentan la capacidad instalada como la efectiva con la que contaba Guatemala para el 2018.

Figura 5. **Capacidad instalada y efectiva del parque generador de Guatemala**



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2019). *Estadísticas subsector eléctrico 2018*. Consulta: 13 de febrero de 2020. Recuperado de <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2019/01/Estadísticas-Subsector-Eléctrico-1.pdf>

7.2. Generación distribuida renovable en Guatemala

De acuerdo con Trebolle (2006) “la generación distribuida responde a su propósito, ubicación, capacidad y tipo de tecnología, siendo una fuente de potencia eléctrica que está conectada a las redes de distribución” (p.15).

Debido al aumento en el consumo eléctrico en las ciudades, a los altos porcentajes de contaminación causados por las centrales convencionales y al avance de las tecnologías. El uso de tecnologías no convencionales asciende cada vez más, tal como es mencionado por De La Cruz, Vélez, Albuerno y Mera

(2018), un ejemplo de esto es la generación distribuida conectada a redes de distribución de baja y media tensión.

La generación distribuida renovable conectada a sistemas de distribución en Guatemala, según Koberle (2012), “puede contribuir a disminuir los costos de transmisión, esto gracias a que la energía eléctrica se estaría produciendo en los lugares de consumo, por lo que no tendría que transmitirse grandes distancias” (p. 53).

Durante los inicios de la electrificación en los países, se han instalado plantas generadoras a grandes distancias de las ciudades, según Koberle (2012), “Guatemala es un caso especial debido a que cuenta con recursos naturales para generación eléctrica a una distancia de 150 kilómetros de la capital, según los mapas de evaluación de recursos solares y eólicos”(p. 51).

El conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol con las que cuenta el país y la ciudad de Guatemala es óptimo para que comercios utilicen sus techos para generación de electricidad utilizando tecnologías, como la fotovoltaica.

En la actualidad, los proyectos de generación distribuida en el territorio nacional están regulados mediante normas técnicas elaboradas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, quien determina si la implementación de generadores distribuidos renovables en determinados nodos del sistema mejora la calidad del suministro eléctrico. En caso contrario, dictamina las ampliaciones o modificaciones a realizar antes de ejecutar estos proyectos.

Algunas de las ventajas de la generación distribuida renovable según Testa y Gomel (2016) son las siguientes:

- Mayor número de respaldos de generación provocando una mayor confiabilidad.
- Las tecnologías como la fotovoltaica y la solar son de rápida instalación, costos bajos y excelente rendimiento.
- La disminución de pérdidas de energía se traduce en ahorros económicos.
- Promueve el desarrollo industrial del país.
- Mejores precios de electricidad.
- Permite satisfacer las crecientes demandas de electricidad de una forma efectiva.
- La generación distribuida es adaptable a las condiciones sociales.

7.2.1. Tecnologías para la generación distribuida renovable

Actualmente, en Guatemala se promueve la generación distribuida que aproveche los recursos de la naturaleza y aumente la confiabilidad del suministro eléctrico. Las tecnologías consideradas para la generación distribuida renovable en el país se establecen en la Ley General de Electricidad según el Congreso de la República de Guatemala (1997) son aquellas “que utilizan la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica, biomasa y otras que el Ministerio de Energía y Minas determine” (p. 2).

7.2.1.1. Biomasa

De acuerdo con la Unión Europea citado por Cerdá (2012) la biomasa es “la fracción biodegradable de productos, desechos y residuos de la agricultura (incluyendo sustancias vegetales y animales), silvicultura e industrias relacionadas, así como la fracción biodegradable de los residuos municipales e industriales” (p. 2).

Las plantas de electricidad que utilizan biomasa como combustible requieren sistemas electromecánicos complejos, según Cerdá (2012) porque estos productos tienen un bajo poder calórico, ya que contienen humedad. Por esto es necesario centrales que cuenten con grandes calderas que conlleven a grandes inversiones económicas (p. 122).

La capacidad para producir electricidad por medio de biomasa en el país es grande, según Koberle (2012), Guatemala se caracteriza por poseer un gran sector agroindustrial (p. 58).

En Guatemala existe un generador distribuido renovable que produce electricidad a partir del metano producido por la descomposición de los desperdicios orgánicos que llegan al relleno sanitario de la zona 3 de la ciudad. El metano es conducido a través de una serie de tuberías y filtros (para quitarle la humedad) hasta el generador eléctrico.

7.2.1.2. Eólica

La energía eólica está influenciada por lo solar, sobre todo por el calentamiento de vientos, según el Ministerio de Energía y Minas (2018). Actualmente, la energía eólica se puede utilizar para producir electricidad de forma limpia y segura mediante aerogeneradores que poseen sistemas mecánicos de rotación y generadores eléctricos (p. 1).

Actualmente, la tecnología eólica es de las más empleadas, según Koberle (2012) gracias a que tienen gran aceptación a nivel social, además no requiere el uso de combustibles fósiles.

7.2.1.3. Geotérmica

La tecnología geotérmica también es considerada para la generación distribuida renovable, según el Ministerio de Energía y Minas (2018) la geotermia puede ser utilizada a través del calor interno de la tierra para la producción eléctrica cuando se dispone de fluidos con temperaturas mayores a 150 °C (p.1).

De acuerdo con el Ministerio de Energía y Minas (2018) Guatemala cuenta con grandes reservas geotérmicas, sin embargo, este recurso es de los menos explotados en la actualidad, de acuerdo con los reportes del Ministerio de (p.1).

7.2.1.4. Hidráulica

La generación distribuida hidráulica puede causar menos daños en los hábitats y poblados, en comparación de las grandes hidroeléctricas. Según Koberle (2012) “el país cuenta con grandes oportunidades para la generación hidráulica a diferentes escalas, desde centrales que generen cientos de Vatios o cientos de Kilo Vatios” (p. 162).

La generación hidráulica a pequeña escala, según Trebolle (2006), “consiste en pequeñas turbinas conectadas a un generador eléctrico. Toda la estructura física necesaria para la regulación del agua a utilizar. Esta tecnología convierte la energía cinética del agua en energía mecánica para finalmente ser convertida en electricidad” (p. 61).

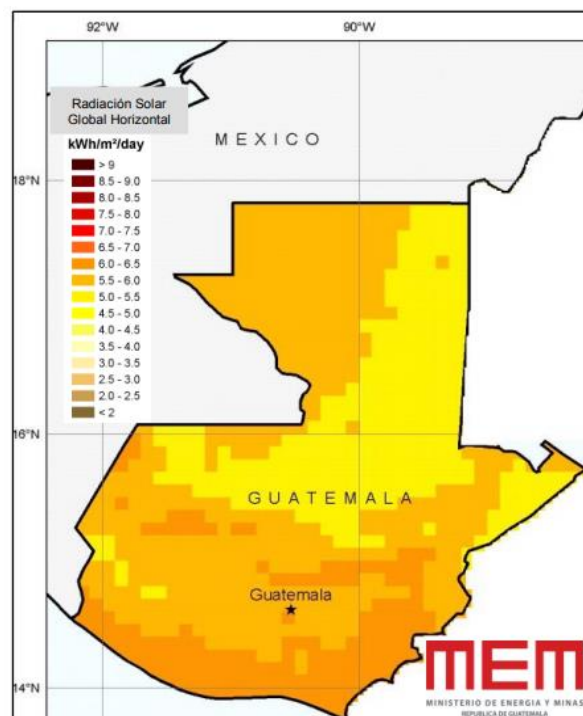
7.2.1.5. Solar fotovoltaica

Esta tecnología es la de mayor auge para la generación distribuida en Guatemala, esto gracias a su acelerado desarrollo en los últimos años. La

energía solar es una fuente inagotable y disponible en cualquier lugar para proyectos de electrificación, ya que se elimina la necesidad de líneas de distribución (en áreas remotas donde aún no se cuenta con electrificación). Esta tecnología toma mayor trascendencia en zonas alejadas, debido a las grandes distancias y a pequeñas poblaciones, hacen rentables proyectos de este tipo (Ministerio de Energía y Minas, 2018).

Actualmente, los proyectos solares son numerosos. Un ejemplo de esto son los centros comerciales, los cuales han optado por aprovechar el área en sus techos para instalar sistemas fotovoltaicos.

Figura 6. **Mapa de potencial solar en Guatemala**



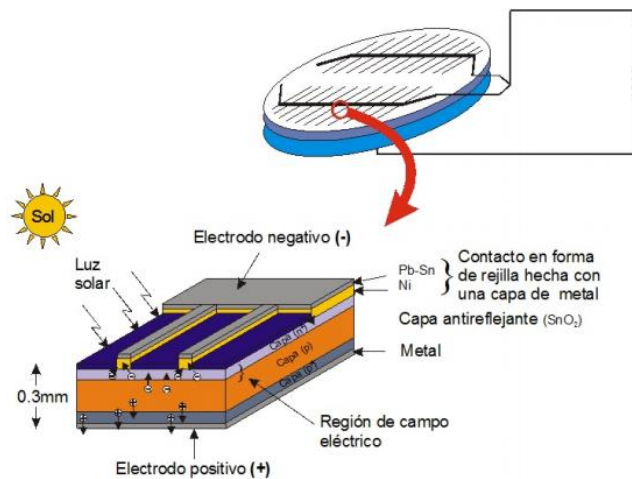
Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2018). *Energía solar en Guatemala*. Consulta: 13 de febrero de 2020. Recuperado de <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2019/01/Estad%C3%ADsticas-Su-bsector-EI%C3%A9ctrico-1.pdf>

7.2.1.5.1. Principio de generación fotovoltaica

La generación eléctrica mediante paneles fotovoltaicos tiene su principio en el efecto fotoeléctrico descubierto por Becquerel en 1839. Según lo establece Velasco y Cabrera (2009) ciertos materiales absorben la luz. Esta energía absorbida excita los electrones, provocando que se desplacen creando cargas negativas en ciertos materiales (materiales con electrones) y cargas positivas en otros (materiales sin mucha presencia de electrones).

Los módulos solares están constituidos por una placa de material tipo p (material dopado de impurezas positivas denominados protones) y una de material tipo n (material dopado con impurezas negativas denominados electrones), esta combinación es análoga a la de un gran diodo tal y como es mencionado por Velasco y Cabrera (2009) estas placas al estar conectadas físicamente por medio de conductores eléctricos hacia cargas externas, permiten la circulación de electrones (flujo de corriente) debido a la excitación provocada por las ondas electromagnéticas del sol.

Figura 7. Efecto fotoeléctrico en una célula solar



Fuente: Matsumoto, Yasuhiro (2011). *Celdas solares de silicio: fundamento y tendencia*.

Consulta: 18 de febrero de 2020. Recuperado de

<https://es.scribd.com/document/222253866/Celdas-Solares-de-Silicio-Fundamento-y-Tendencia-IMPORTANTE>

Los sistemas de generación fotovoltaica se pueden dividir según Trebolle (2006) en:

- Funcionamiento aislado: es utilizado en lugares donde no hay redes de distribución, por lo que es necesario el uso de dispositivos para almacenar energía.
- Conectado a la red eléctrica: la energía necesaria para las cargas es suministrada por la red o por los paneles fotovoltaicos.

7.2.1.5.2. Componentes de un sistema eléctrico fotovoltaico

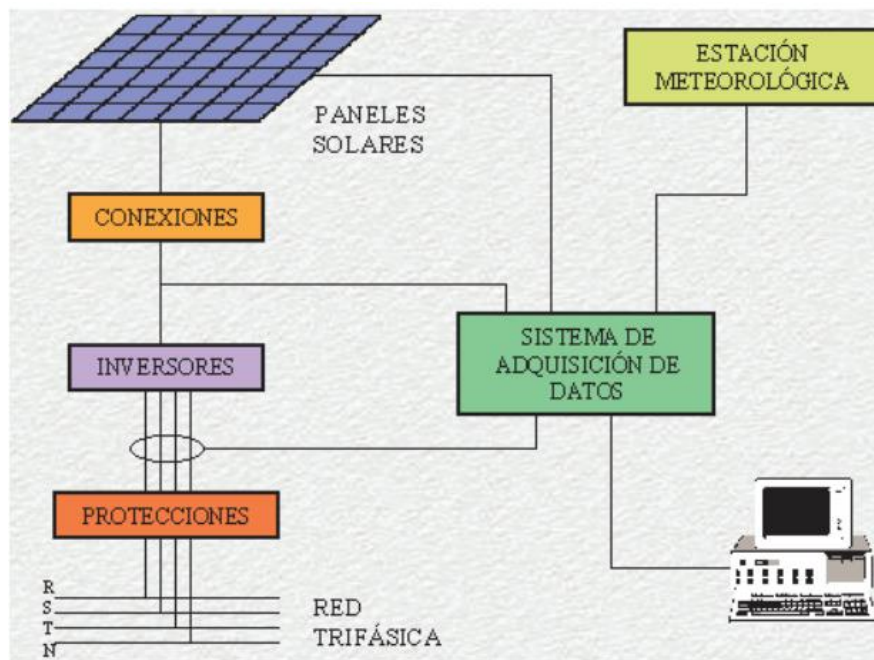
Un sistema fotovoltaico es una instalación eléctrica, por lo que se tienen distintos dispositivos que interactúan para su adecuado funcionamiento y protección ante operaciones no deseadas.

Los siguientes componentes han sido descritos por Velasco y Cabrera (2009):

- Módulos fotovoltaicos: son paneles cuya función es captar los fotones, para crear una corriente continua a través de conductores eléctricos.
- Estructura soporte: es el medio físico para el aseguramiento de los paneles solares, por medio de esta se obtiene la inclinación adecuada para la radiación solar.
- Inversor: su función es convertir la corriente directa producida por los paneles a corriente alterna a la frecuencia y amplitud de la red de distribución. Estos pueden ser monofásicos o trifásicos según sea al tipo de instalación. En la actualidad también vienen equipados de una función denominada MPPT, la cual hace variar los parámetros de voltaje y corriente para obtener la mayor potencia de salida posible.
- Armario general de protección y medida: en este se tiene un interruptor termo magnético, capaz de abrir el circuito ante condiciones anormales un contador, el cual medirá la energía producida por el sistema solar.

- Instalación a tierra: esta funciona como una protección ante sobretensiones no deseadas, además asegura que las fallas de la red no afecten el sistema solar.

Figura 8. **Diagrama de bloque de un sistema fotovoltaico**



Fuente: Velasco y Cabrera (2009). *Generación solar fotovoltaica dentro del esquema de generación distribuida para la provincia de Imbabura*. Consulta: 25 de febrero de 2020.

Recuperado de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9350/1/P72.pdf>

7.2.2. **Norma técnica para la conexión, operación, control y comercialización de la generación distribuida renovable NTGDR**

El siguiente análisis se ha realizado a partir de la NTGDR según la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2008).

Considerando el gran potencial para las energías renovables en Guatemala mediante plantas de menor escala, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica se vio en la necesidad de emitir una norma técnica aplicable a los generadores distribuidos renovables y a las empresas distribuidoras para su adecuado aprovechamiento.

Para la conexión de generadores distribuidos renovables en las redes de baja y media tensión. El generador debe de pedir al distribuidor que evalúe técnicamente el nodo al que desea conectarse, por medio del denominado dictamen de capacidad y conexión.

Es importante resaltar que los usuarios auto productores de electricidad por medio de recursos naturales, no recibirán remuneración alguna por los excedentes de inyecciones que realicen a las redes del distribuidor.

Entre las obligaciones de la empresa distribuida están: permitir la conexión de los generadores distribuidos renovables, instalar las protecciones necesarias para las instalaciones de los generadores distribuidos renovables y de los demás usuarios, modificar sus redes de ser necesario para la correcta ejecución de los proyectos de generación distribuida.

Algunas obligaciones de los generadores distribuidos renovables son construir e instalar la línea eléctrica y sus equipamientos hasta llegar al punto de conexión del distribuidor, hacerse cargo de los gastos en las modificaciones de la red del distribuidor, cumplir con los límites de los parámetros eléctricos establecidos en la norma técnica del servicio de distribución.

7.2.3. Norma técnica del servicio de distribución NTSD

En esta norma técnica se establecen los parámetros a monitorear en el servicio eléctrico. La calidad del producto suministrado por la empresa distribuidora según la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (1999) estará regida de acuerdo a lo siguiente:

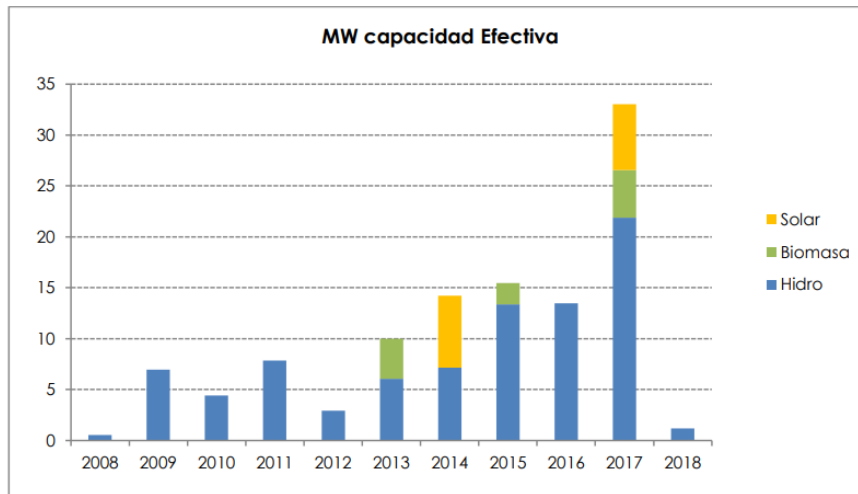
- Regulación de tensión
- Desbalance de tensión en sistemas trifásicos
- Distorsión armónica
- *Flicker*

Estos indicadores deben de estar entre los límites establecidos por dicha norma, para que los usuarios finales no tengan incidencias negativas por parte del servicio de electricidad.

7.2.4. Potencia instalada de generación distribuida renovable

La generación distribuida en Guatemala ha tenido un gran crecimiento, de acuerdo con la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2018), la Empresa Eléctrica de Guatemala es la que cuenta con más usuarios auto productores conectados a sus instalaciones, con una potencia instalada de 11,231.06 kW.

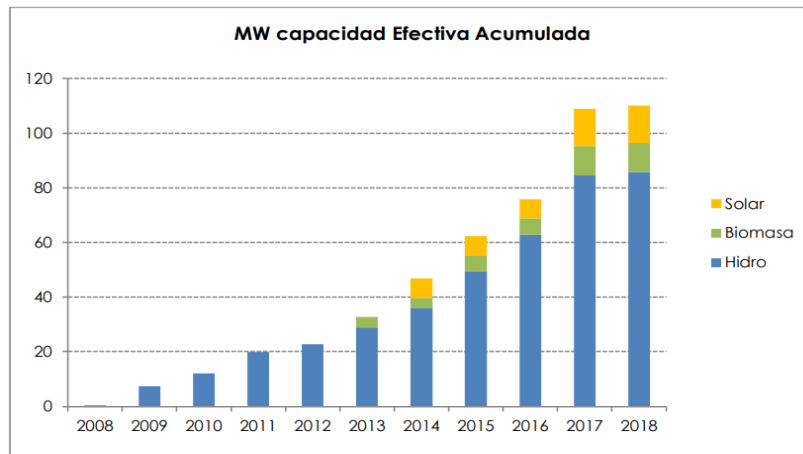
Figura 9. **MW capacidad efectiva**



Fuente: Comisión Nacional de Energía y Minas (2018). *Datos estadísticos usuarios autoprodutores y GDR*. Consulta: 22 de marzo de 2020. Recuperado de <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2019/01/Estad%C3%ADsticas-Su-bsector-EI%C3%A9ctrico-1.pdf>

La capacidad acumulada hasta el 2018 era aproximadamente 110 MW de generación distribuida renovable, teniendo un aumento importante en los últimos años la tecnología solar fotovoltaica.

Figura 10. **MW capacidad efectiva acumulada**



Fuente: Comisión Nacional de Energía y Minas (2018). *Datos estadísticos usuarios autoprodutores y GDR*. Consulta: 22 de marzo de 2020. Recuperado de <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2019/01/Estad%C3%ADsticas-Su-bsector-EI%C3%A9ctrico-1.pdf>

7.2.5. **Potencial de Guatemala para la instalación de energías renovables**

El uso de recursos renovables contribuye con la disminución del precio de la electricidad, tal y como es mencionado por el Ministerio de Energía y Minas (2018). Guatemala posee gran potencial de recursos renovables que han sido poco aprovechados según el Ministerio de Energía y Minas (2018):

- Existe un potencial de energía hidroeléctrica de 6000 MW de la cual solo se ha aprovechado un 23.1 %.
- De energía geotérmica se tiene un potencial de 1000 MW de la que se aprovecha 3.5 %.

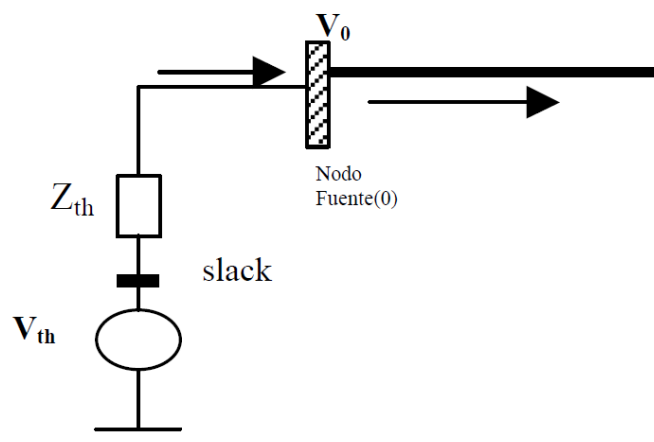
- En cuanto a proyectos con energía solar el país tiene una radiación solar global de 5.3 KWH/m²/día.
- Para el recurso eólico. Se confirma que Guatemala tiene grandes recursos, plasmados en mapas del Ministerio de Energía y Minas donde se tienen las velocidades de viento (m/s) a determinadas alturas.

7.3. Redes de distribución radiales

En la actualidad según Cáceres, Chaparro y Berán (2012) las redes de distribución generalmente son radiales, las cuales pueden modificar su tipo de topología por medio de la apertura o cierre de interruptores de potencia (p.1).

Un circuito radial es aquel que tiene un único alimentador y el flujo de electricidad recorre cierta área en una única dirección, alimentando así a las cargas conectadas.

Figura 11. Esquema de distribución radial



Fuente: Ruiz, Manso y Gallego (2004). *Flujo de carga armónico para sistemas radiales*.

7.3.1. Características de una red de distribución radial

Las redes radiales presentan características muy particulares entre las que se distinguen según Ruiz, Echeverri y Rendón (2004), múltiples conexiones (trifásica, bifásica o monofásica), cargas de distinta naturaleza y líneas sin transposiciones (p.19).

Estas particularidades de las redes de distribución radiales hacen que el flujo de potencia sea en una dirección con esto se tiene un único nivel de cortocircuito impuesto por la alimentación, derivado de esto se puede modelar una adecuada coordinación de protecciones eléctricas. Los análisis de caída de tensión y compensación reactiva son en función de las cargas que están conectadas por debajo de la fuente de alimentación.

Otra característica según Cáceres, Chaparro y Barán (2012) es la posibilidad de la reconfiguración, es decir encontrar rápidamente una nueva configuración radial que reduzca las pérdidas de potencia activa ante fallas.

7.3.2. Redes de distribución radiales sin generación distribuida

Para el análisis de una red de distribución radial sin generación distribuida deben ser analizados los efectos causados por armónicos, por lo que Ruiz, Manso y Gallego (2004) indican:

El flujo de carga armónico, al igual que el flujo de carga convencional, busca establecer el estado del sistema a partir de los parámetros de los elementos lineales que lo conforman, de información sobre demanda en los nodos, de la potencia generada por las máquinas síncronas, de la topología del

sistema y de las características de los elementos no lineales que dan origen a voltajes y corrientes de frecuencias múltiplos de la fundamental en el sistema. (p.65)

7.3.3. Redes de distribución con generación distribuida fotovoltaica

La introducción de estas tecnologías conlleva según Sadeghian, Athari y Wang (2017) una evaluación exhaustiva considerando los impactos por cambio climático, bienestar colectivo y la seguridad energética.

Una red de distribución que cuenta con generación distribuida presenta desafíos importantes como los flujos bidireccionales de potencia. Se crea la necesidad que la información entre dispositivos viaje en forma bidireccional, para una adecuada interacción entre protecciones eléctricas, generación eléctrica y demanda.

Para la incorporación de generación distribuida fotovoltaica, se deben de monitorear constantemente los parámetros que influyen en la estabilidad del sistema, entre estos están según Berrío y Zuluaga (2014) la regulación de voltaje durante máxima y mínima generación fotovoltaica, distorsión en la onda de corriente y voltaje a causa de armónicos, niveles de cortocircuito, entre otros. Todos estos parámetros deben ser analizados, para evitar que salgan de los límites impuestos a las distribuidoras por parte del regulador.

7.3.4. Parámetros eléctricos de la red de distribución

Los análisis siguientes será en base al establecido por Trebolle (2006) cuando se llevan a cabo incorporaciones de generación distribuida en las redes

eléctricas existen modificaciones en los parámetros eléctricos, los cuales son importantes analizar para que estos se mantengan entre los límites admitidos.

7.3.4.1. Regulación de tensión

La regulación de tensión cuando se conecta el generador suele tener menor impacto que cuando este se desconecta inmediatamente por alguna falla, debido a que cuando se conecta, el generador va aumentando la potencia generada gradualmente. El caso crítico es cuando el generador sale del sistema por determinada falla, ya que esto ocasiona un déficit de generación considerable pudiendo provocar que los límites de voltaje salgan de los permitidos al distribuidor.

7.3.4.2. Nivel de cortocircuito

El nivel de cortocircuito se define como el máximo valor de potencia que la red eléctrica puede proveer en una instalación durante determinada falla (provoca esfuerzos térmicos y electrodinámicos). El nivel de cortocircuito dependerá de la configuración de la red, las impedancias, líneas, transformadores, motores, los generadores, entre otros.

El nivel de cortocircuito aumenta en una red con conexión de generadores distribuidos, esto debido a que, al momento de una falla, existe más corriente que aporte a dicha falla (instantes antes de que las protecciones actúen), dando como resultado un aumento a los esfuerzos térmicos y electrodinámicos.

7.3.4.3. Flujo de potencia

El impacto de la generación distribuida también es notorio en los flujos de potencia activa y reactiva de las líneas. Al tener solo un alimentador los flujos de potencia son unidireccionales (del generador hacia la carga en una red sin generación distribuida). Al tener presencia de generación distribuida, puede cambiar, ya que en un determinado momento la generación puede ser mayor a las cargas conectadas, entonces los flujos de potencia cambiarían de dirección, influyendo en la regulación de tensión y la coordinación de protecciones.

7.3.4.4. Coordinación de protecciones eléctricas

Entre las funciones de las protecciones eléctricas de interconexión esta la protección a las instalaciones y equipos. Por tal razón, las protecciones deben detectar defectos internos ya sea del generador o de la red.

Además, las protecciones eléctricas actuales están diseñadas para flujos de potencia unidireccionales, por tal razón, en presencia de flujos bidireccionales es posible que no actúen adecuadamente.

7.3.4.5. Continuidad del servicio eléctrico

La continuidad del servicio eléctrico se vería beneficiado con la integración de generación distribuida, ya que se tendría un respaldo de potencia ante determinadas fallas.

7.3.4.6. Pérdidas de energía eléctrica

La penetración de generación distribuida tiene influencia en las pérdidas del sistema de transporte, ya que se evita transmitir energía eléctrica a largas distancias, obteniendo una disminución considerable de pérdidas eléctricas.

Si la energía generada por la generación distribuida es menor o similar a la demandada, se experimentarán menores pérdidas. Si la energía generada por la generación distribuida es mayor a las cargas de la red, las pérdidas eléctricas pueden ser incluso más grandes que cuando no se contaba con generación distribuida.

7.3.5. Criterios para determinación de un porcentaje óptimo de generación distribuida

Los criterios primordiales para la determinación del porcentaje óptimo admisible de generación distribuida en determinadas redes de distribución según Treballe (2006) serán:

- Pérdidas de energía: para esto serán empleadas gráficas tipo U, por medio de las cuales se determinará el porcentaje donde las pérdidas se reducen a causa de los generadores distribuidos fotovoltaicos.
- Coordinación de protecciones: se analizan los comportamientos de los dispositivos de protección, bajo la premisa que los equipos actuales no están diseñados para actuar ante flujos bidireccionales de potencia.
- Regulación de tensión: es necesario analizar cuanto puede aumentar el voltaje en épocas y temporadas de mucha radiación solar. Así mismo, se

analizará cuanto puede disminuir el voltaje en momentos de mínima generación o ante posibles fallos que provoquen que la generación salga inmediatamente.

- Seguridad energética: es muy importante su evaluación, ya que la introducción de generadores distribuidos tiene como finalidad el aumento de la seguridad energética (disponibilidad de suministro cuando sea requerido).

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. El subsector eléctrico en Guatemala

1.1.1. Estructura Institucional

1.1.1.1. Ente rector

1.1.1.2. Ente regulador

1.1.1.3. Ente operador

1.1.2. Marco regulatorio

1.1.2.1. Ley General de Electricidad

1.1.2.2. Reglamento de la Ley General de Electricidad

1.1.2.3. Reglamento del administrador del mercado mayorista

1.1.3. Mercado mayorista

1.1.3.1. Modelo de mercado

1.1.3.2. Participantes del mercado mayorista

1.1.3.2.1. Generador

1.1.3.2.2. Transportista

- 1.1.3.2.3. Distribuidor
 - 1.1.3.2.4. Comercializador
 - 1.1.3.2.5. Grandes usuarios
 - 1.1.4. Demanda de energía eléctrica en Guatemala
 - 1.1.5. Potencia instalada en el parque generador a nivel nacional
- 1.2. Generación distribuida renovable en Guatemala
 - 1.2.1. Tecnologías para la generación distribuida renovable
 - 1.2.1.1. Biomasa
 - 1.2.1.2. Eólica
 - 1.2.1.3. Geotérmica
 - 1.2.1.4. Hidráulica
 - 1.2.1.5. Solar
 - 1.2.1.5.1. Principio de generación fotovoltaica
 - 1.2.1.5.2. Componentes de un sistema eléctrico fotovoltaico
 - 1.2.2. Norma técnica para la conexión, operación, control y comercialización de la generación distribuida renovable NTGDR
 - 1.2.3. Norma técnica del servicio de distribución NTSD
 - 1.2.4. Potencia instalada de generación distribuida renovable
 - 1.2.5. Potencial para instalación de energías renovables
- 1.3. Actualidad de la red de distribución de la zona 10 de la ciudad de Guatemala
 - 1.3.1. Características de una red de distribución radial
 - 1.3.2. Determinación de la topología de la red

- 1.3.3. Capacidad de la red de distribución
- 1.3.4. Análisis de parámetros eléctricos de la red de distribución
 - 1.3.4.1. Regulación de tensión
 - 1.3.4.2. Nivel de corto circuito
 - 1.3.4.3. Flujo de potencia
 - 1.3.4.4. Coordinación de protecciones eléctricas
 - 1.3.4.5. Continuidad del servicio eléctrico
- 1.4. La red de distribución de la zona 10 de la ciudad de Guatemala con Generación distribuida fotovoltaica
 - 1.4.1. Capacidad de la red de distribución con generación Distribuida
 - 1.4.2. Impacto en los parámetros eléctricos debido a la generación distribuida fotovoltaica conectada a la red
 - 1.4.2.1. Regulación de tensión
 - 1.4.2.2. Nivel de corto circuito
 - 1.4.2.3. Flujo de potencia
 - 1.4.2.4. Coordinación de protecciones eléctrica
 - 1.4.3. Penetración admisible de generación distribuida fotovoltaica en la red de distribución
 - 1.4.4. Seguridad energética debido a la generación distribuida fotovoltaica en la red de distribución

RESULTADOS

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Diseño de la investigación

El diseño para la investigación es del tipo no experimental, para la determinación del adecuado porcentaje de generación distribuida fotovoltaica en la red de distribución de la zona 10 de Guatemala, con la finalidad de lograr que los parámetros del servicio eléctrico se mantengan entre los límites establecidos por el ente regulador hacia la empresa distribuidora y así evitar efectos negativos hacia los usuarios finales.

Este tipo de investigación será no experimental dado que la información a ser analizada no sufrirá modificación alguna, siendo utilizada únicamente para la descripción y análisis del comportamiento de las variables en estudio.

9.2. Tipo de estudio

El estudio es de carácter correlacional, ya que se analizarán las relaciones entre variables como la generación distribuida fotovoltaica. La regulación de tensión, nivel de corto circuito, flujo de potencia, coordinación de protecciones y pérdidas eléctricas.

El enfoque del estudio será de tipo mixto dado que los datos a recolectar serán analizados por sus características y magnitudes según sea el tipo de variable a estudiar.

9.3. Alcance de la investigación

El alcance de la presente investigación será de tipo descriptivo ya que se determinará hasta qué punto es conveniente la introducción de generación distribuida fotovoltaica en la zona 10 de Guatemala, para mantener un adecuado servicio eléctrico. Se basa en la identificación de los potenciales generadores distribuidos fotovoltaicos en el área de estudio, los efectos que causan la generación distribuida a las empresas distribuidoras y al análisis con y sin generación distribuida fotovoltaica.

9.4. Unidades de análisis

El trabajo de investigación tiene como unidad de análisis la red eléctrica de distribución de la ciudad capital. La unidad de análisis pertenece al grupo de colectivo de organizaciones.

9.4.1. Variables

Las variables en estudio se describen a continuación.

Tabla I. **Variables de estudio**

Variable	Definición de la variable	Dimensiones	Indicadores	Técnicas e instrumentos
Generación distribuida renovable	Es el tipo de generación basada en recursos naturales para la producción de energía eléctrica, conectada a las redes de distribución.	Porcentaje de generación distribuida a nivel nacional, impacto en las redes de distribución	Matriz energética del país, modificación o ampliaciones a las redes de distribución	Página de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, NTGDR, NTSD
Clima óptimo para la producción fotovoltaica	El clima hace referencia al estado de las condiciones de la atmósfera que influyen sobre una determinada zona	Análisis de la cantidad de días nublados, despejados, tormentas	Poca o mucha producción fotovoltaica, poca o mucha producción eólica	Medidores comerciales, instrumentos meteorológicos
Regulación de tensión	Es el mecanismo para mantener el voltaje eléctrico en un mismo nivel.	Voltajes suministrados a los usuarios del servicio eléctrico durante los periodos de máxima y mínima demanda	Límites de variación de tensión permitidos a las empresas distribuidoras	Norma técnica del servicio de distribución que establece las variaciones de voltaje permitidas.
Nivel de corto circuito	Es la cantidad de corriente suministrada en el momento de una falla eléctrica por la ausencia de resistencia eléctrica	Cantidad y de capacidad de generadores eléctricos conectados a la red, capacidad del alimentador principal	Fuentes de corriente al momento de un cortocircuito	Estudios de corto circuito, capacidades de los generadores
Flujo de potencia	Es el estudio que analiza los sistemas de potencia operando en estado estacionario	Análisis de las características de las cargas conectadas (resistivas, inductivas o capacitivas)	Voltajes, ángulos de voltajes, potencia activa, potencia reactiva	Voltímetro, software de flujos de potencia
Coordinación de protecciones eléctricas	Es la parametrización de las protecciones para que interactúen de forma adecuada	Determinación de las zonas de protección primarias y secundarias, características de los dispositivos de protección	Sensibilidad, selectividad, velocidad, confiabilidad, simplicidad, economía	Software para elaboración de estudios de coordinación de protecciones

Continuación de la tabla I.

Radiación solar	Conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol	Estudios de radiación solar, realizados por el Ministerio de Energía y Minas	Dirección solar directa, dirección solar difusa, radiación solar por metro cuadrado	Política energética emitida por el MEM, medidor de radiación solar
Contaminación producida por distintas tecnologías para la producción de electricidad	Se denomina contaminación ambiental a la presencia de componentes nocivos (químicos, físicos o biológicos) en el medio ambiente producidos durante la producción de energía eléctrica	Contaminación de ríos, suelo, medio ambiente, verificación de la reducción de los recursos naturales.	Emisión de gases de efecto invernadero, reducción de los recursos naturales, emisiones de CO ₂ , contaminación ambiental según el tipo de tecnología	Reportes por parte de entidades ambientales acerca de la calidad del aire, medición de las emisiones de CO ₂ causado por plantas convencionales

Fuente: elaboración propia, con Microsoft Word.

Tabla II. **Clasificación de variables**

Criterio Variable	Categoría		Numérica		Manipulable	Observable	Nivel de medición
	Dicotómica	Politémica	Discreta	Continua			
Generación distribuida renovable				X	X		Razón
Regulación de tensión				X	X		Ordinal
Nivel de corto circuito				X	X		Ordinal
Flujo de potencia				X	X		Ordinal

Continuación de la tabla II.

Coordinación de protecciones eléctricas		X			X		Nominal
Radiación solar		X				X	Nominal
Contaminación causada por la producción de electricidad		X			X		Nominal
Clima óptimo para la producción de electricidad		X				X	Nominal

Fuente: elaboración propia, con Microsoft Word.

9.5. Fases del estudio

A continuación se describirían las fases de estudio que integran en trabajo de investigación.

9.5.1. Fase 1: revisión documental

En esta fase se revisarán los antecedentes relevantes que aporten información importante para la ejecución del tema de investigación propuesto, así mismo se consultara la información pertinente en leyes, normas, libros, artículos científicos, resoluciones o políticas, para construir la fundamentación teórica necesaria para la adecuada ejecución del trabajo de campo del trabajo de investigación.

9.5.2. Fase 2: determinación de los potenciales generadores distribuidos fotovoltaicos

La zona geográfica por analizar es el departamento de Guatemala para determinar que entidades están en las capacidades de invertir en generación distribuida fotovoltaica, todo esto se realizara en base a una evaluación de ubicación para determinar las condiciones climáticas (como la radiación solar óptima) para este tipo de tecnología. Así mismo, se investigarán los comercios que actualmente cuentan con este tipo de generación para determinar los demás centros comerciales que cuenten con las características necesarias como para adoptar este tipo de negocio.

9.5.3. Fase 3: determinación de los efectos de la generación distribuida a las empresas de distribución

En esta fase se evaluarán los impactos económicos y técnicos causados por la generación distribuida a las empresas de distribución, mediante informes o análisis de las empresas distribuidoras de diferentes países. De igual manera, se tiene contemplado solicitar reportes a las empresas distribuidoras locales donde indiquen la influencia de este tipo de generación conectada a sus redes de distribución.

9.5.4. Fase 4: análisis de los parámetros eléctricos de la red de distribución sin generación distribuida

En esta fase se analizará una red de distribución sin generación distribuida. Este análisis se llevará a cabo mediante software de libre acceso. Se realizará trabajo de campo con la empresa distribuidora del área en estudio para la obtención del diagrama unifilar que sirva para determinar la regulación de tensión

en tiempos de mínima y máxima demanda eléctrica, el nivel de cortocircuito impuesto por la red de alimentación. La determinación de la dirección del flujo de potencia, el análisis de la coordinación de protecciones y la cantidad de las pérdidas eléctricas en la red de distribución.

9.5.5. Fase 5: análisis de los parámetros eléctricos de la red de distribución con generación distribuida fotovoltaica

En esta fase al igual que en la fase anterior se modelara la red de distribución con la ayuda del software de libre acceso, con la finalidad de determinar la incidencia de la generación distribuida a la regulación de tensión en momentos de máxima y mínima generación fotovoltaica, determinar cuánto aumenta el nivel de corto circuito debido a los generadores, determinación de los flujos bidireccionales de potencia, la complejidad para la coordinación de protecciones y el aumento o disminución de pérdidas eléctricas.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Se emplearán distintas técnicas para el análisis de los datos obtenidos en campo, con la finalidad de lograr los objetivos planteados.

10.1. Análisis univariado

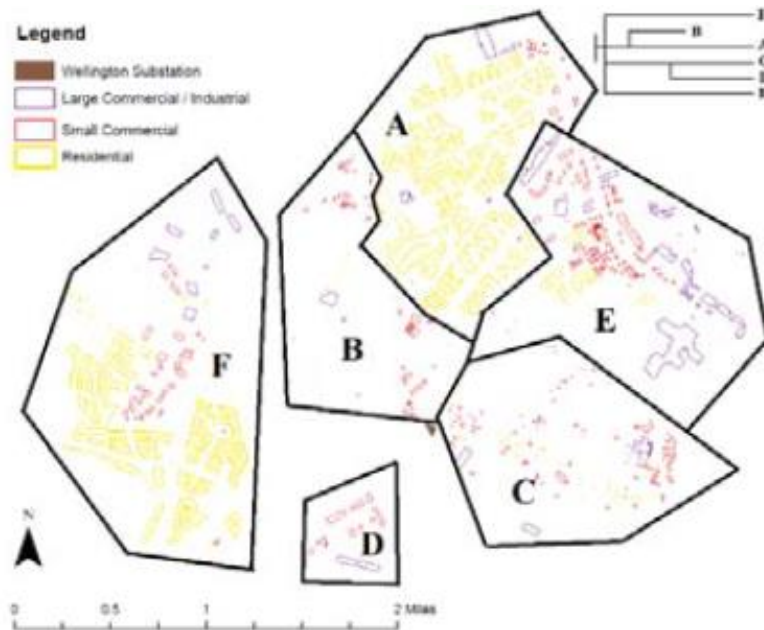
Inicialmente, se analizarán las variables de forma separada para los casos de la red de distribución con y sin generación distribuida fotovoltaica. Se llevará a cabo una recopilación de datos cuantitativos, se emplearán los métodos de la estadística descriptiva para la tabulación, limpieza y organización de los datos necesarios. Esto bajo la delimitación del área de estudio y la identificación de las variables a estudiar.

La representación de los datos será mediante gráficos de tipo:

- Barras
- Pie
- Otros

Este tipo de representación gráfica contribuirá a la investigación para subdividir la región de estudio según sea la radiación solar de estas, tal como es ejemplificado por Hamidreza, Mir y Wang (2017) en el siguiente gráfico (p.2).

Figura 12. **Subdivisiones del área de estudio según la radiación solar**



Fuente: Hamidreza, Mir y Wang (2017). *Optimized solar photovoltaic generation in a real local distribution network.*

De igual manera se utilizarán las principales medidas de tendencia central para su análisis correspondiente:

- Media
- Moda
- Rango

Estas técnicas serán utilizadas para determinar las pérdidas de energía eléctrica en la red. La demanda de electricidad en el área de estudio y la cantidad de generación distribuida fotovoltaica. Así mismo, se emplearán tablas para la tabulación de los datos obtenidos por medio de las medidas de tendencia central.

10.2. Análisis bivariado

Una vez analizadas las variables de forma separada antes y después de la introducción de la generación distribuida fotovoltaica. Se llevará a cabo un análisis bivariado, en el cual se analizará como se modificaron los parámetros eléctricos debida a esta.

La representación gráfica para este tipo de análisis será mediante:

- Gráficos de dispersión
- Barras
- Pie

Se analizará la radiación solar de los potenciales generadores distribuidos fotovoltaicos de la zona 10, (como edificios y centros comerciales), tal y como se observa a continuación.

Figura 13. **Distribución de baja, media y alta radiación solar en edificios**



Fuente: Hamidreza, Mir y Wang (2017). *Optimized solar photovoltaic generation in a real local distribution network.*

10.3. Análisis matemático

Se hará empleo también de análisis matemático para la evaluación de los parámetros eléctricos de la red de distribución, con la finalidad de determinar sus magnitudes y direcciones.

El análisis matemático a emplear estará basado en lo estipulado por Hamidreza, Mir y Wang (2017) con las siguientes formulas:

$$\alpha(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N P_{PV_i}^{max}}{\max\left(\sum_{j=1}^M P_{Load_j}\right)} * 100$$

[1]

“Donde P_{PV} es la potencia de salida por la cantidad de paneles fotovoltaicos y P_{Load} . Es la cantidad de carga eléctrica respectiva. Con este análisis se pueden analizar distintos tipos porcentajes de generación distribuida fotovoltaica” (p.4).

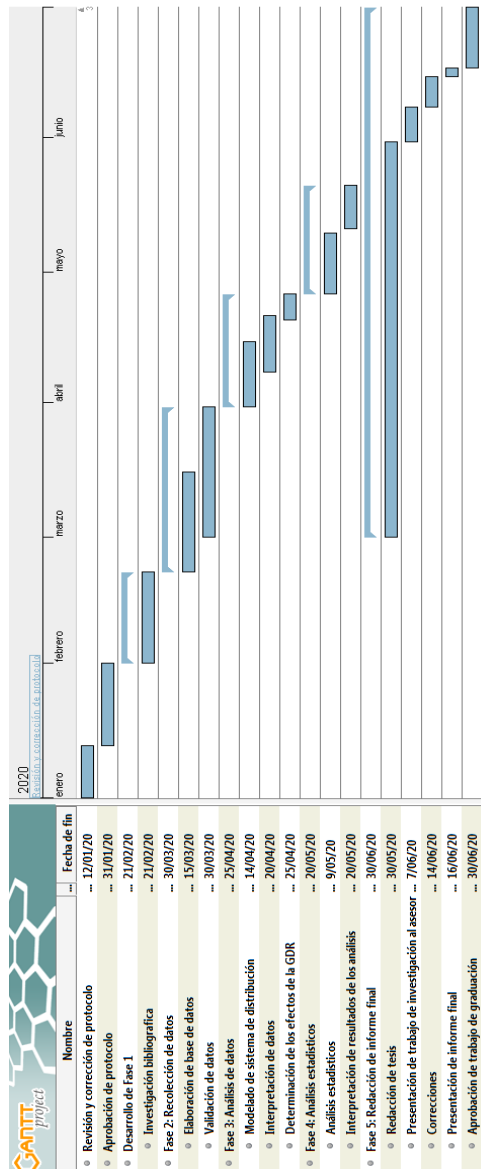
Así mismo, se puede calcular la pérdida total de energía mediante:

$$E_{loss} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{l=1}^L |i_L^t|^2 R_L \quad [2]$$

“Por medio de estas fórmulas se puede determinar cuántas perdidas se tienen a determinado porcentaje de generación fotovoltaica” (p.4).

11. CRONOGRAMA

Figura 14. Diagrama Gantt



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Project.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El estudio es factible ya que se cuentan con los recursos necesarios para el desarrollo de las distintas fases del trabajo de investigación.

Entre los recursos a utilizar están:

- **Recurso humano:** en este recurso se tiene tanto el tiempo del tesista para la elaboración del trabajo de investigación, así como el tiempo del asesor para las revisiones y pautas a seguir.
- **Recursos tecnológicos:** estos son los recursos de cómputo y software para la modelación del sistema de distribución.
- **Recurso de transporte:** vehículo para el levantamiento de datos durante el trabajo de campo.
- **Recurso económico:** este recurso será para la compra de los consumibles durante la etapa de recolección de datos, como en la etapa de la elaboración del trabajo de investigación.
- **Recurso de información:** se cuenta con la información bibliografía necesaria.
- **Imprevistos:** se ha considerado un cinco por ciento para los imprevistos que puedan surgir durante el trabajo de investigación.

A continuación, se describen los recursos necesarios, así como las cantidades y porcentajes que estos abarcan.

Tabla III. **Presupuesto para elaboración del trabajo de investigación**

Recurso	Descripción	Costo unitario [Q]	Cantidad	Total [Q]	Porcentaje	Fuente
Recurso humano	Honorarios del investigador mensual	2,000	6	12,000	60 %	Recursos propios
Equipo de computo	Se utilizará equipo de cómputo con software para el modelado de la red de distribución	2,000	1	2,000	10 %	Recursos propios
Recursos de oficina	Material de oficina (papel, tinta de impresora, entre otros)	1,500	1	1,500	7.5 %	Recursos propios
Recurso humano	Aporte por parte del asesor	1,500	1	1,500	7.5 %	Aporte del asesor
Transporte	Depreciación de vehículo y combustible	2,000	1	1,700	8.5 %	Recursos propios
Energía eléctrica	Suministro de energía eléctrica (mensual)	50	6	300	1.5 %	Recursos propios
Imprevistos	Actividades imprevistas	1,000	1	1,000	5 %	Recursos propios
TOTAL				20,000	100 %	

Fuente: elaboración propia.

13. REFERENCIAS

1. Bae, I., kim, J., kim, J. y Singh, C. (marzo de 2004). Optimal operating strategy for distributed generation considering hourly reliability worth. *IEEE Xplore*, vol 1(19), pp. 287-292.
2. Benavides, J. y Dussan, M. (2004). *Economía política de las finanzas y subsidios del sector eléctrico de Guatemala*. Washington, Estados Unidos: Banco Interamericano de Desarrollo.
3. Berrío, L. y Zuluaga, C. (enero de 2014). Smart grid y la energía solar fotovoltaica para la generación distribuida: una revisión en el contexto energético mundial. *Ingeniería y Desarrollo*, vol 32(2), pp. 369-396.
4. Cáceres, N., Chaparro, E. y Barán, B. (5 de noviembre de 2012). *Operador de corrección de radialidad en reconfiguración de sistemas de distribución eléctrica utilizando algoritmos genéticos*. [Mensaje de blog]. Recuperado de file:///C:/Users/Noe%20Ren/ Downloads/ PaperACR_Aranducon2012Final.pdf
5. Cerdá, E. *Energía obtenida a partir de biomasa*. (2 de junio de 2012). [Mensaje de blog]. Recuperado de file:///C:/Users/Noe%20Ren/ Downloads/EnergiaObtenidaapartirdebiomasaCEICE.pdf

6. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (1 de enero de 2019). *Mercado de energía eléctrica*. [Mensaje de blog]. Recuperado de <http://www.cnee.gob.gt/pdf/informacion/GuiadellInversionista2015.pdf>
7. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (13 de mayo de 2019). *Matriz energética*. [Mensaje de blog]. Recuperado de http://www.cnee.gob.gt/wp/?page_id=2436
8. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (10 de octubre de 2018). *Datos estadísticos usuarios autoprodutores y GDR'S*. [Mensaje de blog]. Recuperado de http://www.cnee.gob.gt/wp/?page_id=4445
9. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (9 de septiembre de 1999). *Resolución CNEE No. 09-99. Norma técnica del servicio de distribución*. [Mensaje de blog]. Recuperado de http://www.cnee.gob.gt/wp/?page_id=811&page=3
10. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (24 de octubre de 2008). *Resolución CNEE No. 171-2008. Norma técnica para la conexión, operación, control y comercialización de la generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía*. [Mensaje de blog]. Recuperado de <http://www.cnee.gob.gt/pdf/resoluciones/2008/CNEE%20171%202008.pdf>
11. Congreso de la República de Guatemala. (1997). *Acuerdo gubernativo número 256-97. Reglamento de la Ley General de Electricidad*. Guatemala: Ministerio de Finanzas.

12. Congreso de la República de Guatemala. (1996). *Decreto 93-96. Ley General de Electricidad*. Guatemala: Diario de Centroamerica.
13. De La Cruz, J., Vélez, N. y Mera, G. (diciembre de 2018). Trascendencia de la generación distribuida (GD) y el uso de las redes inteligentes. *Revista de investigadores en Energía, Medio Ambiente y Tecnología*, vol 3(2), pp. 13-17
14. Escobar, A., Torres, C. e Hincapie, I. (abril de 2009). Conexión de un sistema fotovoltaico a la red eléctrica. *Scientia Et Technica*, vol 1(44), pp. 31-36
15. Espinasa, R., Balza, L., Hinstrosa, C., Sucre, C. y Guerra, S. (2013). *Dossier energético Guatemala*. Washington, Estados Unidos: Banco Interamericano de Desarrollo.
16. Gómez, N. (diciembre de 2016). Mercado de oportunidad de la energía en Guatemala: un modelo teórico. *Revista Academica ECO*, vol 15, pp. 71-87.
17. Grisales, L., Restrepo, B. y Jaramillo, F. (agosto de 2017). Ubicación y dimensionamiento de generación distribuida. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol 27(2), pp. 157-176.
18. Hamidreza, S., Mir, A. y Wang, Z. (3 de noviembre de 2017). *Optimized solar photovoltaic generation in a real local distribution network*. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1706/1706.02770.pdf>

19. Hernández, J. y Medina, A. (abril de 2006). Conexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica: calidad de suministro. *Revista de Estudios sobre Sierra Magina*, vol XXVI(44), pp. 3-36.
20. Jin, K., Jae, C. e In, S. (11 de octubre de 2004). *Optimal operating strategy for distributed generation considering hourly reliability worth*. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Optimal-operating-strategy-for-distributed-hourly-Bae-Kim/b29bfae1922f0e0f9e348d6e30c01920a721451>
21. Koberle, A. (2012). *Energizar a Guatemala: propuesta de un plan de electricidad sostenible*. Guatemala: International Rivers.
22. Matsumoto, Y. (6 de mayo de 2011). *Celdas solares de silicio: fundamento y tendencia*. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/222253866/Celdas-Solares-de-Silicio-Fundamento-y-Tendencia-IMPORTANTE>
23. Ministerio de Energía y Minas. (18 de octubre de 2017). *Subsector eléctrico en Guatemala*. [Mensaje de blog]. Recuperado de <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2017/10/Estad%C3%ADsticas-Subsector-El%C3%A9ctrico.pdf>
24. Ministerio de Energía y Minas. (4 de noviembre de 2018). *Energía eólica en Guatemala*. [Mensaje de blog]. Recuperado de https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/11/Energ%C3%ADa-E%C3%B3lica-en-Guatemala.pdf?__cf_chl_jschl_tk__=24ceee2db01fec57d5347493910e2ac77668116-1599498206-0-AeFLNGL5y5nko2he-Mju0SZpgCTwlqeMGhHMXRAMBogHDIRUPRILPvpgLphd5

YWr8JTirz4VZPU4XjdJ1BMbcpsqHX5XLA1jNFXhPSCdrWGeaCel
LI1WWDz3T_UnuMy53O9h9dpxyWEWRe4djRXTVEar_XOD9XD
Ad6cyah5H8aCKWty0lskOSwMN4zvWkwdRQOgXLErxj88SBryrY
NZb2j2GBWDN6MED3Kw0wl1k7SvBiA945IKSZdBRqmt4OzUrifDI
E_8klzyMt1IMf-MnEIZZiAm0pGw9dqoqZDSS71uJPkFIGtl06QUK
oY4TJyUS-XTrAx3SzEsOMxgZyeFcZMhYYxMpX7kWhSHF2fvn_
T-6

25. Ministerio de Energía y Minas. (25 de mayo de 2018). *Energía geotérmica*. [Mensaje de blog]. Recuperado de <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/09/Energ%C3%ADa-Geot%C3%A9rmica.pdf>
26. Ministerio de Energía y Minas. (14 de noviembre de 2018). *Energía solar en Guatemala*. [Mensaje de blog]. Recuperado de <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/11/Energ%C3%ADa-Solar-en-Guatemala.pdf>
27. Ministerio de Energía y Minas. (11 de julio de 2018). *Las energías renovables en la generación eléctrica en Guatemala*. [Mensaje de blog]. Recuperado de <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/07/Energ%C3%ADas-Renovables-en-Guatemala.pdf>
28. Ministerio de Energía y Minas. (31 de enero de 2019). *Estadísticas del subsector eléctrico*. [Mensaje de blog]. Recuperado de [http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2019/01/Estad%C3%ADsticas-Su
bsector-El%C3%A9ctrico-1.pdf](http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2019/01/Estad%C3%ADsticas-Subsector-El%C3%A9ctrico-1.pdf)

29. Royo, F. (2010). *Generación distribuida: integración económica en las empresas eléctricas distribuidoras*. (Tesis de maestría). Universidad De Zaragoza. Zaragoza, España. recuperado de <https://zaguan.unizar.es/record/4973/files/TAZ-TFM-2010-041.pdf>
30. Ruiz, A., Echeverri, M. y Rendón, R. (mayo de 2004). Flujo de carga trifásico para sistemas radiales de distribución. *Scientia et technica*, vol X(24), pp. 19-24.
31. Sadeghian, H., Athari, M. y Wang, Z. (3 de noviembre de 2017). *Optimized solar photovoltaic generation in a real local distribución network*. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1706/1706.02770.pdf>
32. Testa, M. y Gomel, D. (2016). *Renovables generación eléctrica distribuida: energía limpia desde los propios usuarios*. Argentina: Foro de Ecología Política.
33. Treballe, D. (2006). *La generación distribuida en España*. (Tesis de maestría). Universidad Pontificia Comillas. Madrid, España. Recuperado de https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Generacion_Distribuida.pdf
34. Velasco, G. y Cabrera, E. (7 de noviembre de 2009). *Generación solar fotovoltaica dentro del esquema de generación distribuida para la provincia de Imbabura*. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9350/1/P72.pdf>