



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ESTUDIO DEL IMPACTO DE UNA GENERACIÓN
DISTRIBUIDA CONECTADA A LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA 13.8KV EN
AMATITLÁN Y MONITOREO DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA
DESCENTRALIZADA**

Luis Gerardo Godoy Calito

Asesorado por el MA Ing. Douglas Eduardo Zeceña Aguirre

Guatemala, agosto de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ESTUDIO DEL IMPACTO DE UNA GENERACIÓN
DISTRIBUIDA CONECTADA A LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA 13.8KV EN
AMATITLÁN Y MONITOREO DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA
DESCENTRALIZADA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS GERARDO GODOY CALITO

ASESORADO POR EL M.A. ING. DOUGLAS EDUARDO ZECEÑA AGUIRRE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, AGOSTO 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. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
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 PARA EL ESTUDIO DEL IMPACTO DE UNA GENERACIÓN
DISTRIBUIDA CONECTADA A LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA 13.8KV EN
AMATITLÁN Y MONITOREO DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA
DESCENTRALIZADA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 19 de abril de 2021.

Luis Gerardo Godoy Calito

Ref. EEPFI-0494-2021
Guatemala, 19 de abril de 2021

Director
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: ESTUDIO DEL IMPACTO DE UNA GENERACIÓN DISTRIBUIDA CONECTADA A LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA 13.8KV EN AMATITLÁN Y MONITOREO DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DESCENTRALIZADA**, presentado por el estudiante **Luis Gerardo Godoy Calito** carné número **200312617**, 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,

Douglas Eduardo Zeceña Aguirre
ING. MECANICO ELECTRICISTA
COLEGIADO No. 11878

Mtro. Douglas Eduardo Zeceña Aguirre
Asesor

"Id y Enseñad a Todos"

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

Edgar Darío Álvarez Cotí
Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

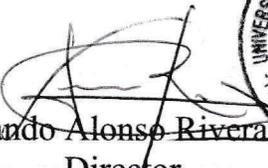




EEP-EIME-011-2021

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: **ESTUDIO DEL IMPACTO DE UNA GENERACIÓN DISTRIBUIDA CONECTADA A LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA 13.8KV EN AMATITLÁN Y MONITOREO DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DESCENTRALIZADA**, presentado por el estudiante universitario Luis Gerardo Godoy Calito, 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



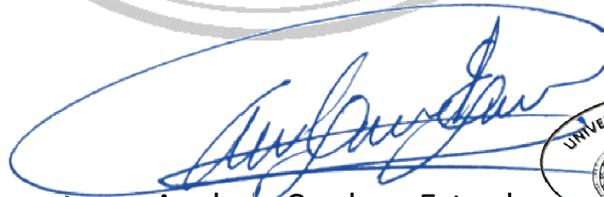
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Guatemala, abril de 2021

DTG. 332-2021

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 Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ESTUDIO DEL IMPACTO DE UNA GENERACIÓN DISTRIBUIDA CONECTADA A LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA 13.8KV EN AMATITLÁN Y MONITOREO DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DESCENTRALIZADA**, presentado por el estudiante universitario: **Luis Gerardo Godoy Calito**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, agosto de 2021

AACE/CC

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Gracias por la vida y el entendimiento el cual me permite culminar una de mis metas.
- Mis padres** Gerardo Godoy Hernández y Marina Calito Gutiérrez, por haberme traído al mundo y guiado a través de él, mi eterno agradecimiento por su apoyo para hacer realidad este sueño.
- Mi esposa** Lucrecia Martínez Barrera, gracias por ser mi apoyo incondicional a lo largo de la carrera y gracias por darme la fortuna de tenerte y ser mi puente para alcanzar esta meta.
- Mis hijos** Luis Diego y Sarah Valeria Godoy Martínez, esta meta alcanzada es por y para ustedes y que sea un ejemplo por seguir en su futuro.
- Mi familia** A mis hermanos, tíos, primos y a toda mi familia, que es lo mejor y más valioso que Dios me ha dado.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi <i>alma mater</i> que me permitió formarme como una persona profesional.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar este trabajo de graduación, especialmente la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
Ing. Douglas Zeceña	Amigo, compañero y asesor, quien con su apoyo y conocimiento he logrado finalizar este documento.
Mis amigos	Por haberme acompañado y apoyado durante la carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO.....	VII
RESUMEN	XI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
4. JUSTIFICACIÓN.....	11
5. OBJETIVOS	13
6. NECESIDADES POR CUBRIR.....	15
7. MARCO TEÓRICO	17
7.1. Generación distribuida	17
7.2. Generación intermitente.....	19
7.3. Generación solar	21
7.4. Tipos de generación distribuida	24
7.5. El impacto en una red de distribución.....	25
7.6. Fallas en la red.....	26
7.6.1. Por coordinación de protecciones en la red.....	26
7.6.2. Por generación en isla.....	29

7.6.3.	Por calidad de la energía.....	30
7.6.4.	Por coordinación de mantenimientos.....	33
7.7.	Beneficios de los consumidores.....	33
7.7.1.	Monitoreo de consumo.....	34
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	35
9.	METODOLOGÍA.....	39
9.1.	Características del estudio.....	39
9.2.	Unidades de análisis.....	40
9.3.	Variables.....	40
9.4.	Fases del estudio.....	43
9.4.1.	Fase 1.....	43
9.4.2.	Fase 2.....	43
9.4.3.	Fase 3.....	44
9.4.4.	Fase 4.....	44
9.4.5.	Fase 5.....	45
9.5.	Resultados esperados.....	45
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	47
11.	CRONOGRAMA.....	51
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO.....	53
13.	REFERENCIAS.....	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Árbol de problemas	7
2.	Curva de consumo eléctrico en Guatemala, en un día	18
3.	Curva de generación de dos generadoras solares.....	20
4.	Esquema de representación de una generación distribuida	22
5.	Representación gráfica de un sistema fototérmico para el calentamiento de un fluido.....	23
6.	Fotografía de un fusible con su base de aisladores de porcelana	27
7.	Representación de las curvas tipo de los fusibles tipo T correspondiente a los tiempos mínimos de fusión	28
8.	Representación gráfica de una red de distribución eléctrica con sus protecciones.....	29
9.	Representación mecánica y gráfica de la generación eléctrica.....	31
10.	Representación gráfica de ondas senoidales creadas por la electrónica.....	32

TABLAS

I.	Definición de variable pregunta auxiliar 1	40
II.	Definición de variable pregunta auxiliar 2	41
III.	Definición de variable pregunta auxiliar 3	41
IV.	Definición de variable pregunta auxiliar 4	42
V.	Definición de variables	42
VI.	Cronograma de actividades	51
VII.	Recursos necesarios	53
VIII.	Valorización económica.....	54

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H	Altura
\$	Dólar estadounidense
E	Este
°	Grados
°C	Grados Celsius
Hz	Hercio
h	Horas
=	Igual que
Km	Kilómetro
KW	Kilovatio
KV	Kilovoltio
>	Mayor que
MW	Megavatio
MW/h	Megavatio por hora
<	Menor que
m	Metro
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetro
N	Norte
O	Oeste
'	Pies o minutos
%	Porcentaje
P	Potencia

“	Pulgadas o segundos
Q	Quetzales
RPM	Revoluciones por minuto
S	Sur
W	Vatio
V	Voltio

GLOSARIO

Acometida	Es la instalación eléctrica final para la conexión del usuario a la red de distribución en baja tensión.
Alta tensión	Es el nivel de tensión utilizado para el transporte de energía eléctrica a largas distancias. Normalmente se encuentra entre los 69,000 a 400,000 voltios
AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
Armónicos	Son corrientes parásitas que provocan inestabilidad en la red eléctrica.
Autoproduccion	Es un usuario del sistema de distribución que inyecta energía eléctrica a la red por medio de un sistema de generación propio.
Baja tensión	Es el nivel de tensión que se distribuye directamente a los usuarios. Normalmente se encuentra en entre los 120 a 240 voltios.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica
Combustibles fósiles	Es la sustancia proveniente de restos orgánicos fosilizados, lo cual al quemarse generan gran cantidad de energía calorífica.

Contador bidireccional	Es el dispositivo que se encarga de medir la energía de un cliente en ambos sentidos, de la red eléctrica al usuario y también del usuario a la red eléctrica.
Corriente eléctrica	Es el desplazamiento de electrones a través de un conductor metálico, medido en amperios.
Distribuidora	Empresa encargada de distribuidor la energía eléctrica a usuarios finales.
Energía intermitente	Es el tipo de energía que no está continuamente disponible para su conversión en electricidad.
Energía renovable	Es la energía que proviene de fuentes naturales que se pueden llamar inagotables, ya sea por la inmensa cantidad o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.
Estabilidad eléctrica	Es la habilidad de un sistema de potencia para mantener un nivel de tensión aceptable.
Generación distribuida	Es la generación de energía eléctrica por medio de muchas fuentes próximos a las cargas.
Generación solar	Energía renovable que se obtiene de la radiación electromagnética procedente del sol
Generador eólico	Generador que aprovecha la energía del viento para mover una hélice y producir energía.

Hidroeléctrica	Es una instalación que utiliza la energía cinética del agua para convertirla en energía mecánica y aprovechar el movimiento para generar energía eléctrica.
Hora pico	Es el periodo horario del mayor consumo de electricidad.
Hora valle	Es el periodo horario del menor consumo de electricidad.
Inversor eléctrico	Es un dispositivo electrónico cuya función es cambiar el voltaje de entrada de corriente continua a corriente alterna.
Media tensión	Es el nivel de tensión utilizado en áreas urbanas para la distribución de energía eléctrica a medianas distancias. Normalmente se encuentra entre 7,800 a 35,000 voltios.
Onda deforme	Son ondas no senoidales que provocan inestabilidad en la red eléctrica.
Panel solar	Dispositivo que capta energía de los rayos solares para convertirlo en energía eléctrica.
Potencia eléctrica	Es la proporción por unidad de tiempo, con la cual la energía eléctrica es transferida por un circuito y absorbida por una carga.

Rayos ultravioleta	Rayos invisibles que forman parte de la energía proveniente del sol.
Sistemas fotovoltaicos	Es el conjunto de equipos conformado por celdas solares para generar energía eléctrica por medio de la luz solar.
Sobrecarga	Es un exceso de consumo eléctrico que provoca que sobrepasen los parámetros eléctricos de conductores y transformadores.
Subestación	Es una instalación destinada a establecer niveles de tensión acorde a la necesidad, para transporte o distribución eléctrica.
Tarifa Eléctrica	Es el costo de la electricidad impuesto por la CNEE y cobrado por la distribuidora a los usuarios finales.
Tensión eléctrica	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, medida en voltios
Transformador	Máquina estática que varía el voltaje de un valor a otro.
VAD	Valor agregado de distribución, que corresponde al costo medio de la red de distribución y la operación de esta.

RESUMEN

La generación solar es el tipo de energía más barata que se puede aprovechar, la cual ya se tiene la tecnología para que un usuario de energía eléctrica produzca su propia fuente, por lo que es importante mantener una estabilidad en la red eléctrica conociendo los efectos que una generación solar puede empezar a provocar en la empresa de distribución eléctrica.

Con el aumento del consumo de energía, por cada usuario, proporcionalmente también aumenta el costo mensual de la energía eléctrica, provocando molestias en los usuarios sin conocer el verdadero problema que normalmente es su consumo. Muchos usuarios optarán por la instalación de paneles solares en sus casas, generando una energía que, con la medición adecuada, se realiza un ajuste en el consumo de energía, por lo que se traduce en un menor costo mensual del cliente hacia la distribuidora autorizada del área.

El presente diseño de investigación busca denotar los problemas que puede ocasionar un conjunto de instalaciones de generación distribuida por los clientes en un núcleo de población, la cual busca deducir soluciones y recomendaciones para la robustez de la red eléctrica de la distribuidora autorizada del área.

1. INTRODUCCIÓN

En todo el mundo se busca la optimización de energía eléctrica eficiente y barata, en Guatemala actualmente se cuenta con energía eléctrica asequible, sin embargo, se busca un beneficio aun mayor, y la tecnología forma parte de la mejora del sistema eléctrico nacional, por lo cual muchos clientes toman la decisión de realizar una instalación de generación distribuida, ya sea por medio de paneles solares o generadores eólicos.

Sin embargo, la generación solar o la generación eólica son bien llamados generadores distribuidos variables, debido a su intermitencia para la generación de energía eléctrica. Debido a dicha intermitencia, es necesario realizar el estudio del impacto sobre una red de distribución eléctrica, cuando el autoprodutor no consume en su totalidad la energía generada y esta ingresa a la red de distribución de la empresa que presta el servicio.

La ley general de electricidad y su reglamento en Guatemala, permite y obliga a la distribuidora de electricidad que cualquier cliente que desee conectarse a la red y esté dentro de la franja de los 200mts, sea conectado con obligatoriedad, por lo que la distribuidora debe encontrar la manera de mejorar su red con respecto a la generación distribuida renovable y variable.

El primer capítulo se basa en el conocimiento y presentación de la tecnología con la generación distribuida, en el cual se planteará el estudio del impacto que dicha tecnología puede causar sobre una red de distribución eléctrica, y conocer los distintos factores teóricos en el que puede llevar a inconveniente en la red.

El segundo capítulo se presenta la viabilidad, en el que varios proyectos relacionados con la generación distribuida intermitente pueden ser rentables y recuperables en un tiempo determinado según el costo de la tarifa eléctrica actual autorizada por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica de Guatemala.

En el tercer capítulo se identificará y se trazará la generación de energía eléctrica en los sectores más afectados y vulnerables a la instalación de generadores renovables intermitentes a la red de distribución eléctrica, la cual puede provocar desabastecimiento a los clientes por las fallas ocasionadas.

El cuarto capítulo se mencionará las tecnologías de monitoreo estándar e inteligentes que permiten tener un detalle más exacto del consumo y generación de energía eléctrica en los clientes autoprodutores, que se conectan a la red de la distribuidora local.

2. ANTECEDENTES

La mejora tecnológica de la generación distribuida renovable en ocasiones genera problemas de conexión a una red de distribución eléctrica ya existente, debido a la necesidad de la demanda de una energía barata, el cliente podría hacer uso de tecnología de generación solar, la cual se conecta a la red de baja tensión, la que es proveída por una distribuidora local, este tipo de conexiones obliga a la distribuidora a realizar mejoras en su red, para obtener datos reales del valor de corriente que pasa por su red eléctrica, mejoras que no están consideradas dentro de los valores que la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) reconoce, al provocar mayor pérdida monetarias por el aumento de dichas mejoras, lo cual puede impactar positiva o negativamente a la tarifa eléctrica que perciben los clientes de la distribuidora.

El problema se origina cuando la red eléctrica empieza a operar arriba de su capacidad para la que fue diseñada, tanto en su regulación como en la protección, y esto se debe al incremento de la demanda eléctrica que es producido por el crecimiento demográfico del área. La compañía de distribución eléctrica trabaja en la solución de este tipo de problema, pero a esto se le debe sumar la alta inversión que representa un incremento de la capacidad de regulación y el de la línea de la distribuidora local. Hoy en día existe un número bastante alto de líneas de distribución eléctrica que operan bajo esta normativa, la cual fue propuesta por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica de Guatemala.

La generación distribuida no es un concepto nuevo, pero hoy en día se orienta al uso estratégico de unidades modulares de generación solar, las que pueden ser diseñadas e instaladas de forma aislada a la red de distribución

eléctrica local, para un servicio específico o generar interconexiones a la red próxima a los puntos de consumo que es el principal concepto para la investigación de esta tesis. Para ellos se debe alcanzar los objetivos y beneficios que se logran al mejorar la calidad de la energía y la reducción de los costos al utilizar dicha tecnología (Smolenski, 2012).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La generación distribuida intermitente genera muchos beneficios, pero también generan varios problemas en la red que se describirán en este estudio.

- Contexto general

El problema se centra en una actualización tecnológica en la red de distribución eléctrica para el perímetro del municipio de Amatitlán con un voltaje de 13.8KV, la cual se instalan proyectos de generación distribuida intermitente, de varios clientes conectados a la red de distribución eléctrica, y provoca una inestabilidad por varios factores, principalmente en horas establecidas de mayor generación solar y que la potencia no sea consumida en su totalidad por el cliente, el cual envía dicha energía a la red de distribución.

- Descripción del problema

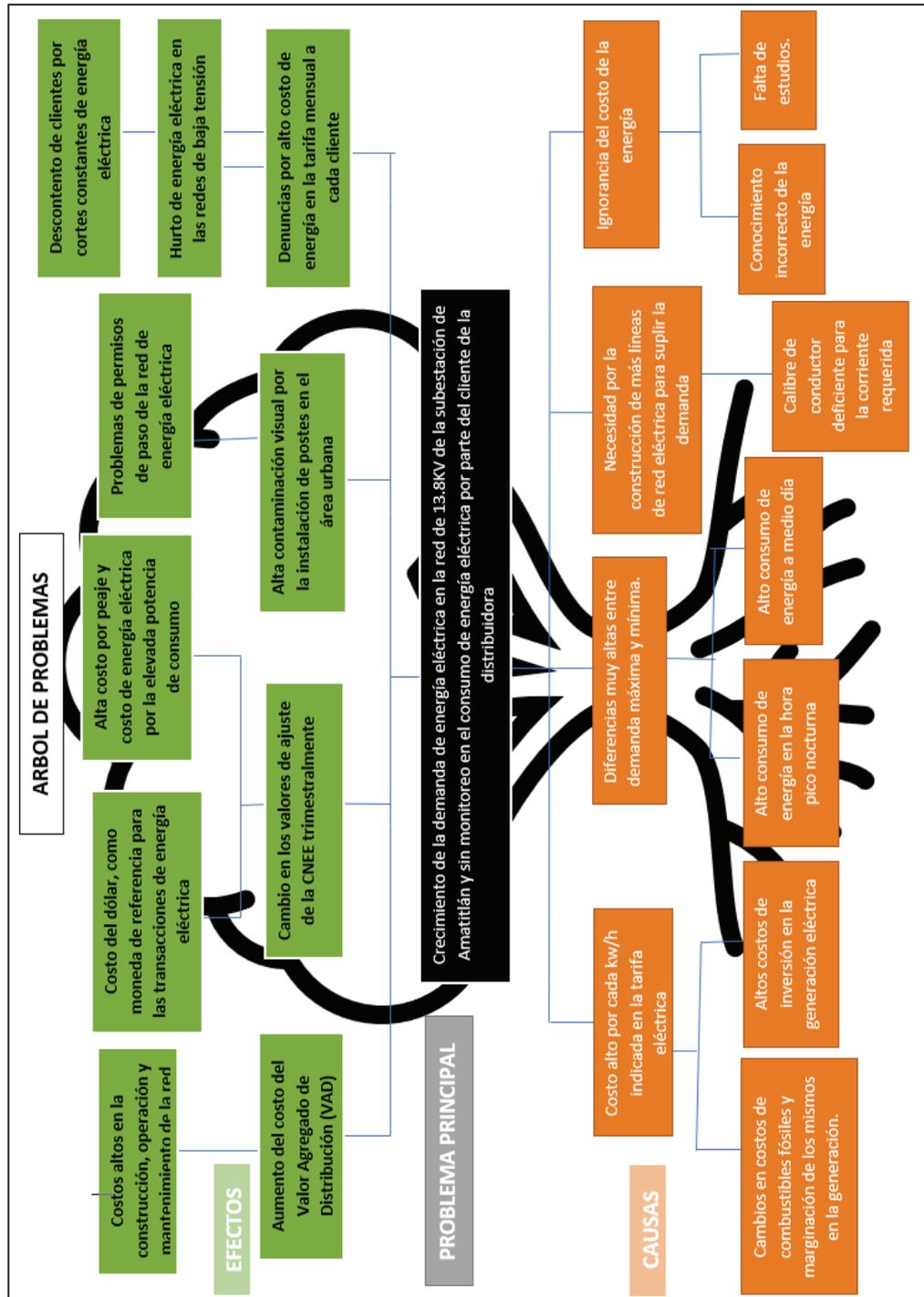
El crecimiento de la demanda de energía eléctrica en la red de 13,8KV de la subestación de Amatitlán y sobrecarga en los transformadores de cada sector, en el que provoca la caída de tensión y cortes de energía.

El crecimiento de la conexión de los generadores distribuidos intermitentes en la red de distribución eléctrica, lo cual puede provocar inestabilidad por corrientes circulantes de retorno cuando dicha generación se encuentra en su punto de mayor incidencia solar.

La sobrecarga de transformadores, sí se da el caso, en el que un sector se encuentra conectados varios sistemas fotovoltaicos, y la sumatoria de

potencias de cada uno de estos generadores distribuidos puede sobrepasar la potencia nominal del transformador, lo cual provocaría una sobrecarga y desconexión de este, causando fallas en el sector de baja tensión.

Figura 1. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

Por lo cual, a continuación, se presentan las preguntas que se han definido a través del árbol de problema, presentado en la figura 1, con las que se elaborará este trabajo de diseño de investigación.

¿Cuál será el impacto de la generación distribuida intermitente conectado a las redes de distribución eléctrica 13,8KV de la subestación Amatitlán y monitoreo del consumo de energía eléctrica descentralizada? Para resolver la interrogante se deberá responder a las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuáles son los problemas que podrían darse por la introducción de la generación distribuida intermitente por medio de paneles solares conectados a la red de baja tensión 120v/240v, en el municipio de Amatitlán?
- ¿Cuál es la rentabilidad de la generación distribuida intermitente, tomando en cuenta los aspectos de la inversión inicial, en base al consumo energético del autoprodutor y la tarifa eléctrica actual de la distribuidora autorizada del área del municipio de Amatitlán?
- ¿Cuáles son los efectos y trazabilidad de la energía eléctrica en horas de alta generación y el consumo de los clientes en el municipio de Amatitlán?
- ¿Qué beneficios se obtienen de un monitoreo de consumo eléctrico descentralizado por parte del cliente autoprodutor con excedentes de energía?

- Delimitación del problema

El planteamiento de estudio es en la red de distribución eléctrica de cobertura de la distribuidora local del municipio de Amatitlán, descentralizando el flujo de energía, analizando el impacto de corrientes generadas por energía solar.

Se estudiará a los usuarios potenciales para la instalación de una generación distribuida en una red de la distribuidora local, en la cual la corriente de generación no tiene otra salida más que el propio transformador de 13,8KV a 120 / 240v.

Al realizar la planificación de una propuesta para la generación solar distribuida en el área indicada, se puede realizar un sistema automático de consumo, con medidores inteligentes que se conectan entre sí y mejorar el consumo de energía eléctrica a los usuarios de la red. Los medidores trasladaran información de consumo y generación a cada usuario por medio de un usuario de red, entregado por la distribuidora para controlar su consumo y generación por paneles solares.

4. JUSTIFICACIÓN

La tecnología de generación distribuida por medio de la luz solar ha empezado a tomar auge, la cual los clientes utilizan para beneficiarse con su propia energía y auto consumirla. Sin embargo, la generación distribuida por luz solar tiene su máxima punta de generación en horario fuera de mayor consumo por parte del cliente, por lo que en muchas ocasiones la generación del cliente retorna a la red de la empresa distribuidora de electricidad, ocasionando que la energía de retorno sea consumida en el área cercana llamada baja tensión. El verdadero problema es cuando dicha energía no es consumida en el área de baja tensión y ésta se transfiere por medio del transformador a la red de media tensión 13,800 voltios, ocasionando daños en el transformador cuando la energía sobrante por parte del cliente es mayor a la del diseño del transformador.

Se considera que la energía solar fotovoltaica es una de las fuentes más prometedora de energía renovable en el mundo, y comparándola con las fuentes no renovables las ventajas son muy claras: no contamina, no tiene partes móviles que analizar y mantener en buenas condiciones, y no requiere de mucho mantenimiento por lo que la integración de un sistema fotovoltaico para la generación de energía eléctrica en la planta tendrá un impacto de gran relevancia en la disminución del consumo de energía eléctrica sin limitaciones en su uso y aplicación, ya que el cliente podrá generar su propia energía eléctrica de una forma segura y económica, lo que le permitirá solventar sus necesidades de consumo con sus propios medios, permitiéndole a largo plazo ampliar la capacidad instalada del sistema si así lo requiere.

Esta investigación de tesis tiene la intención de darle la importancia que tiene este tipo de energía para el área de generación del Mercado Eléctrico de Guatemala. Actualmente es demasiada la contaminación que existe a base de la generación con combustibles fósiles.

Implementar paneles solares que generen energía a partir de la radiación solar implica un gran avance para nuestra sociedad, es dejar atrás la generación del exceso de gases de efecto invernadero que afectan directamente a la atmósfera e indirectamente a todos los seres vivos del planeta, debido al cambio climático que afecta al mundo (Sánchez y Reyes, 2015).

La instalación de generación distribuida renovable de energía solar en las zonas residenciales en el sector eléctrico de Guatemala podría proveer algo más que la energía actualmente consumida por medio de generación de carbón, combustibles fósiles e hidroeléctricas, que son lo que mayormente existen en el mercado eléctrico guatemalteco y ayudarán a mejorar la estabilidad de la red con las protecciones adecuadas y su diseño previamente fortalecido para evitar cualquier sobrecarga en la red.

5. OBJETIVOS

General

Determinar el impacto de la generación distribuida automática conectada a las redes de distribución eléctrica 13,8KV de la subestación del municipio de Amatitlán y control del consumo de energía eléctrica descentralizada.

Específicos

- Definir los factores involucrados en la introducción de la generación distribuida intermitente por medio de paneles solares conectados a la red de baja tensión 120v/240v, en el municipio de Amatitlán.
- Identificar la rentabilidad de la generación distribuida intermitente, al tomar en cuenta los aspectos de la inversión inicial, con base en el consumo energético del autoprodutor y la tarifa eléctrica actual de la distribuidora autorizada del área del municipio de Amatitlán.
- Describir los efectos y trazabilidad de la energía eléctrica en horas de alta generación y el consumo de los clientes en el municipio de Amatitlán.
- Analizar el beneficio de un monitoreo de consumo eléctrico descentralizado por parte del cliente autoprodutor con excedentes de energía.

6. NECESIDADES POR CUBRIR

Se analizarán los beneficios que generará la conexión de generadores distribuidos intermitentes a la red de distribución y el impacto que esta tecnología puede aportar a los clientes específicos de la distribuidora, al tomar en cuenta a los clientes que están por debajo del consumo de 300kwh y por encima de éste, los llamados clientes con tarifa social y tarifa no social, respectivamente. Al igual que los clientes que consumen demanda de energía eléctrica mayor a 11KW.

Se mostrará los análisis de carga en el área específica de la distribuidora eléctrica en cuanto a la instalación de una red de generación distribuida y su impacto en el consumo de los clientes de los alrededores, analizándolo a través de la curva de carga original y la nueva curva de carga con la conexión de cada generador a la red.

La tarifa eléctrica es uno de los puntos importantes para determinar si existe una mejora de esta, debido al menor traslado de energía por medio de la distribuidora a los puntos de consumo con los clientes conectados a un generador distribuido. Al estudiar el impacto a nivel global y definiendo la mejora tecnológica que el distribuidor deberá cubrir siendo obligada por la ley general de electricidad para la conexión de dichos clientes especiales y sus protecciones para evitar las desconexiones involuntarias de la red.

Con la generación distribuida renovable, la generación convencional empezará a tener una tendencia a la baja, lo cual será beneficio para evitar que los generadores que generan electricidad con costo muy alto marginen los precios de la energía y cambien la tarifa de distribución eléctrica.

La tecnología por cubrir por parte de la distribuidora eléctrica debe contar con un sistema de protecciones tanto en la baja tensión de 120/240 voltios, como también en la media tensión de 13,8KV.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Generación distribuida

En un futuro cercano, en Guatemala, se puede beneficiar de la instalación de una generación distribuida por medio de pequeñas empresas, restaurantes, hoteles, centros comerciales y clientes a los que desean saltar a la tecnología de una generación propia. Ya sea por medio de una generación fotovoltaica o por medio de la energía eólica, que son las tecnologías que se tiene mayor alcance en cuento a la inversión inicial.

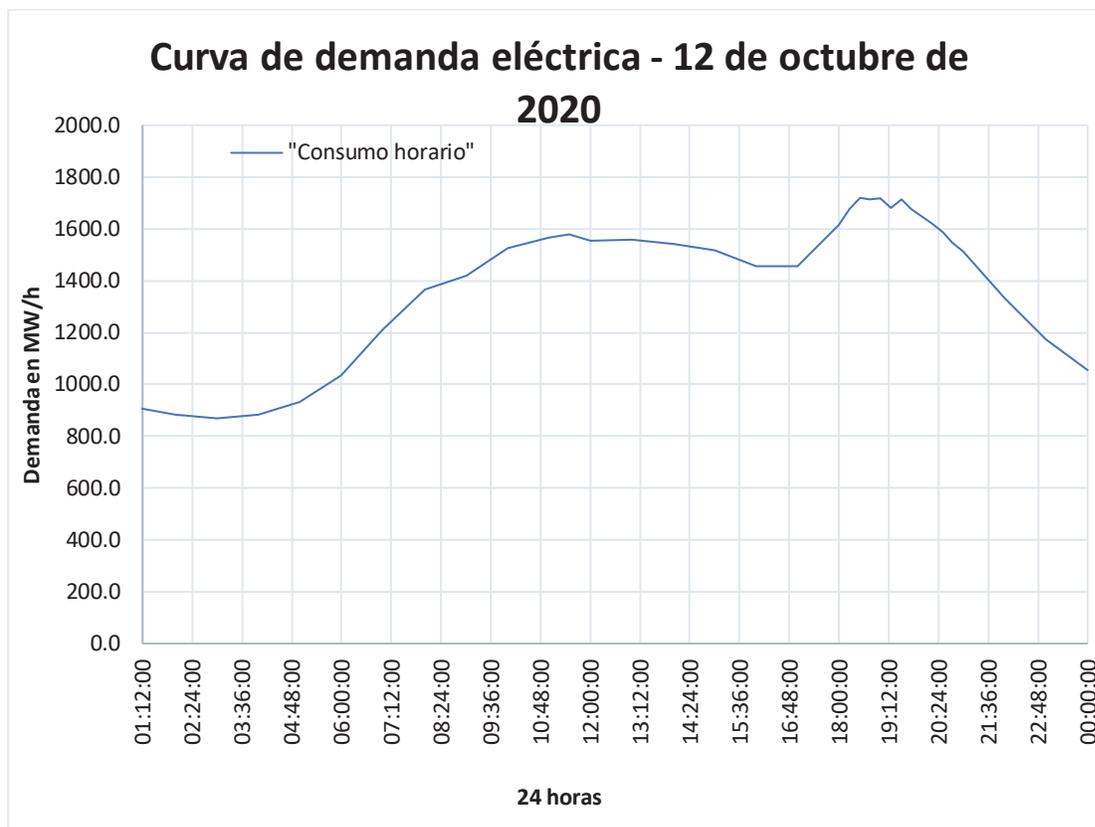
Esto puede ayudar a mejorar una rentabilidad económica en muchos comercios, al no tener la preocupación del gasto de una energía que puede llegar a afectar a fin de mes su caja chica.

En el área de Amatitlán, los comercios y empresas han aumentado considerablemente, la cual tiene un efecto bastante fuerte sobre la red de distribución local, al considerarse mejoras en la red, que incluye protecciones y una robustez en su línea principal de distribución eléctrica.

La generación distribuida concede varias ventajas para la red de distribución eléctrica existente, ventajas como la reducción de pérdidas técnicas en el conductor, la posibilidad del funcionamiento de micro redes en isla, esto da mayor flexibilidad y también la opción de que sea modular, todo esto previendo pequeñas interrupciones que puedan suceder a la línea principal de la distribuidora local (Colmenar, Díaz, Collado y Castro, 2015).

Además, la generación distribuida en forma abundante aporta algo muy importante que es la disminución de los gases de efecto invernadero, que son causados por los generadores que alimentan todo el mercado eléctrico guatemalteco. Normalmente en los horarios de mayor consumo eléctrico, que en Guatemala se mantiene en dos diferentes horarios, el mayor que es de un horario de las seis de la tarde a nueve de la noche, y el segundo horario de menor consumo, pero importante, es entre las 11 de la mañana a la 1 de la tarde.

Figura 2. **Curva de consumo eléctrico en Guatemala, en un día**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Administrador del Mercado Mayorista (AMM).

Así como se han mencionado las ventajas, también se tiene desventajas por parte de la generación distribuida intermitente, y es justo como su nombre lo indica, la intermitencia. Los generadores distribuidos, como bien ya se mencionó, los más comunes son por medio de la energía solar y la energía eólica, estas dos fuentes de energía no se pueden predecir con exactitud, debido a que el sol y el viento nunca serán constantes, por lo que la eficiencia y su factor de generación es muy bajo, y la disponibilidad será en base a las estacionalidades (Dirks, Gorrissen, Hathaway y Skorski, 2014).

Sin embargo, hoy en día, la tecnología ha avanzado y se han creado paneles fotovoltaicos más eficientes, la cual capturan los rayos solares con mayor eficiencia, por lo que esta tendencia va en aumento, volviendo cada vez más viable la instalación de generación distribuida por medio de la energía solar.

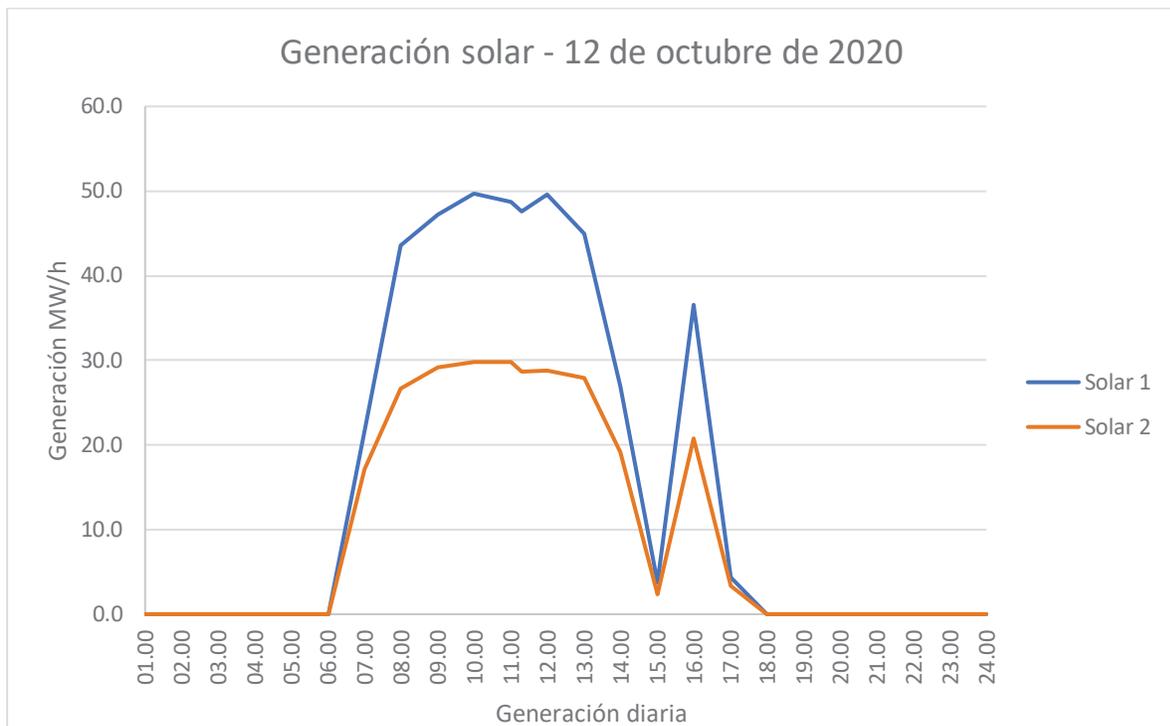
7.2. Generación intermitente

La generación intermitente es uno de los principales inconvenientes que presenta a la red un generador solar, la cual se refiere a las horas que el sol está presente y los paneles fotovoltaicos son alcanzados por los rayos de luz, y a la vez transformarse en energía eléctrica recolectada por el arreglo de varios paneles.

En la figura 3 se muestra la generación de un día por parte de dos generadoras solares conectadas a la red eléctrica nacional. En esta gráfica se muestra muy bien como puede ser la intermitencia de los rayos del sol sobre dichos paneles, por ejemplo, a las 15 horas del día la generación bajo un porcentaje bastante alto y esto es debido a alguna tormenta que generó que los paneles captaran muy poca luz solar. La generación será mínima, debido a que

a través de las nubes pueden traspasar los rayos ultravioletas, lo cual aún pueden captar las placas solares del generador.

Figura 3. **Curva de generación de dos generadoras solares**



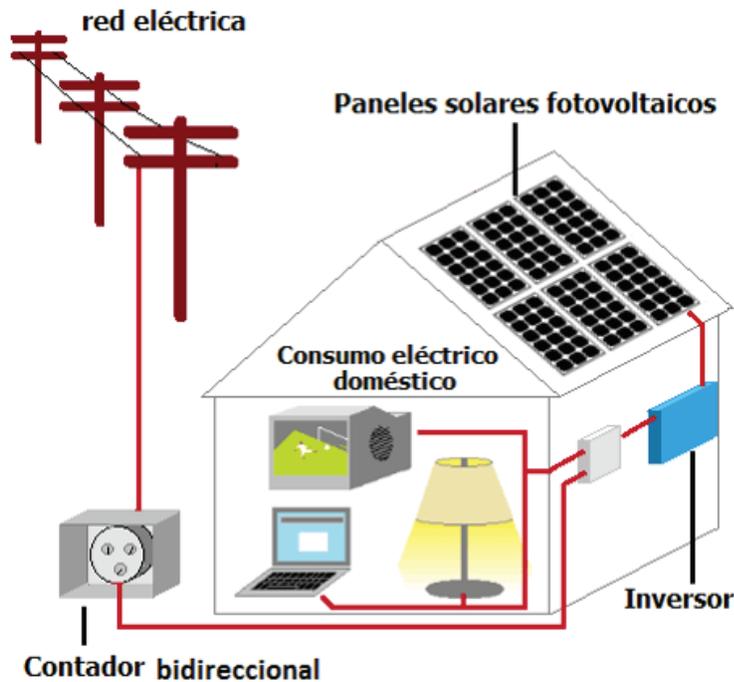
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Administrador del Mercado Mayorista (AMM).

7.3. Generación solar

El Sol genera una enorme cantidad de energía que puede ser aprovechada, dicha energía solar es la que llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética (rayos de luz, calor y rayos ultravioleta) procedentes del Sol. El aprovechamiento de la energía solar se puede realizar de dos formas: por medio de un sistema fotovoltaico y por medio de un sistema fototérmico.

El sistema fotovoltaico consiste en la transformación directa de la energía luminosa en energía eléctrica. Para este caso se utilizan unas placas solares formadas por células fotovoltaicas (de silicio o de germanio). Este sistema a la fecha es el que cuenta con una eficiencia más alta, siendo esta tecnología la que más se ha adaptado al sistema de distribución eléctrica por medio de grandes granjas de paneles solares o pequeñas plantas que se encuentran distribuidas y son utilizadas, mayormente, para el consumo propio (Goetzberger y Hoffmann, 2005).

Figura 4. Esquema de representación de una generación distribuida

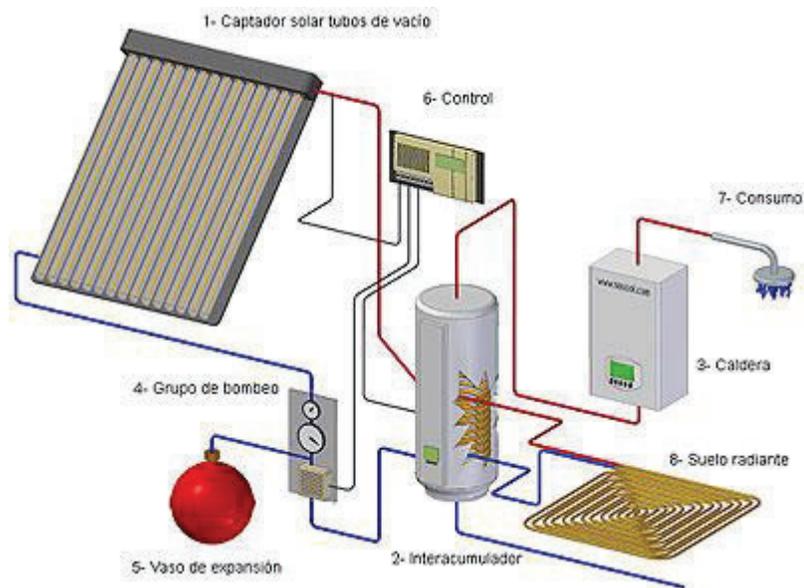


Fuente: Green Energy Latinoamérica (2017) *Sistema Solar Fotovoltaico On-Grid*, Consulta: octubre 2020. Recuperado de: <https://www.greenenergy-latinamerica.com/componentes-sistema-fotovoltaico>.

El sistema fototérmico tiene como finalidad el transformar la energía solar en energía térmica almacenada en un líquido. Para calentar el líquido se emplean unos dispositivos llamados colectores o captadores, la cual están interconectados a un tanque que mantiene dicho líquido a una temperatura más alta que el ambiente. Con este tipo de sistema, muchos hogares pueden ahorrar energía al dejar de usar un calentador eléctrico, la cual, en muchos casos, son los aparatos que provocan más consumo de energía eléctrica en el hogar, siendo estos aproximadamente el 30-40 % del consumo total de la vivienda.

En la figura 5 se muestra un ejemplo de cómo puede instalarse un sistema fototérmico para que una vivienda sea beneficiada manteniendo el agua a una temperatura agradable para la ducha, el lavamanos, lavatrastos o incluso la máquina lavadora de ropa.

Figura 5. **Representación gráfica de un sistema fototérmico para el calentamiento de un fluido**



Fuente: Greenlands Revolutions (2013) *Una vivienda más ecológica y sostenible*. Consulta: octubre 2020. Recuperado de:
<https://greenlandsrevolution.wordpress.com/2013/09/08/una-vivienda-mas-ecologica-y-sostenible/>

Para los sistemas descritos existen varias ventajas, principalmente podríamos denotar que es una energía no contaminante y proporciona energía barata y aprovechable para el consumo propio.

Aun así, los sistemas tienen un inconveniente muy importante, es una fuente de energía intermitente, debido a que depende del clima y del tiempo que el Sol está presente. Además, su rendimiento energético es bastante bajo. La energía captada para su transformación en energía eléctrica es aproximadamente del 15 al 20 % de la energía total que el sol transmite en un metro cuadrado de radiación electromagnética (Keyhani y Marwali 2012).

7.4. Tipos de generación distribuida

De acuerdo con Meng (2003), un sistema de generación de energía distribuida conectada a la red de distribución eléctrica está compuesta de una serie de fuentes de generación de energía a pequeña escala que proporcionan energía eléctrica en un lugar que es más cercano al usuario que la propia subestación o planta de generación de energía.

Las fuentes de generación renovable a pequeña escala actualmente disponibles incluyen turbinas eólicas, generación por biomasa, geotérmicas, pequeños generadores hidroeléctricos y paneles fotovoltaicos. Actualmente, la mayoría de los sistemas de generación distribuido variable se controlan y optimizan localmente por medio de un cliente autoprodutor sin tener en cuenta los requisitos de grandes áreas. Por lo tanto, para lograr todo el potencial de un sistema de generadores distribuidos que forman parte de la red del distribuidor local deben integrarse de manera efectiva como un todo. Se requiere un sistema de medición rentable y programable para proporcionar información suficiente y amigable para evitar los excedentes de energía que sean suministrados a la red de distribución local y así evitar daños que puedan provocar las corrientes excedentes sobre una red de baja tensión o incluso la red de alta tensión por medio de un transformador de la red del distribuidor local (Samaniego, 2009).

La energía producida por un generador de paneles solares de un cliente autoprodutor se puede considerar como una máquina para hacer dinero, la energía es el dinero, si la energía consumida en la vivienda del cliente es menor a la que el generador está entregando, lo cual es llamado energía excedente, se traslada a la red de distribución local y se pierde, entonces el cliente está perdiendo parte de su dinero producido por la energía solar y se lo entrega totalmente gratis al distribuidor local (Flavin, Gonzalez, Majano, da Rocha, y Tagwerker, 2014).

No siempre es beneficioso para un distribuidor local que un autoprodutor tenga excedentes de energía. De acuerdo con la red existente puede tener un impacto negativo ante la existencia de esta corriente circulante que puede provocar los siguientes problemas.

7.5. El impacto en una red de distribución

De acuerdo con Magdi y Fouad (2015), los impactos técnicos de la generación distribuida en la operación del sistema se pueden evaluar en diferentes niveles.

- Coordinación de protección.
- Funcionamiento en régimen permanente.
- Comportamiento dinámico.
- Prestación de servicios auxiliares.

La evaluación del impacto provocado por la generación distribuida renovable intermitente en una red de distribución local debe ser considerado en varios escenarios, al tomar en cuenta los diferentes horarios que la dicha generación emite su mayor potencia a la red. (Hora valle u hora pico). Cada hora

es distinto el impacto que éste puede provocar, por lo que se debe tener en cuenta la curva de cargabilidad del área de la distribuidora local.

7.6. Fallas en la red

Las fallas en la distribución eléctrica son muchas, desde fallas por sobrecargas, por sobretensión, por desbalance entre las fases del circuito y así también como un golpe de un vehículo sobre una estructura de la red eléctrica. A continuación, se explicará que tipo de falla pueden ocurrir por una generación distribuida.

7.6.1. Por coordinación de protecciones en la red

La red de la distribuidora local contiene varios dispositivos de protección contra fallas en la red. Uno de los principales dispositivos es llamado fusible, este es uno de los más utilizados en el sistema de protecciones, conectado en el lado de media tensión de la red. Su función principal es la limitación de sobrecorrientes en la línea.

Figura 6. **Fotografía de un fusible con su base de aisladores de porcelana**

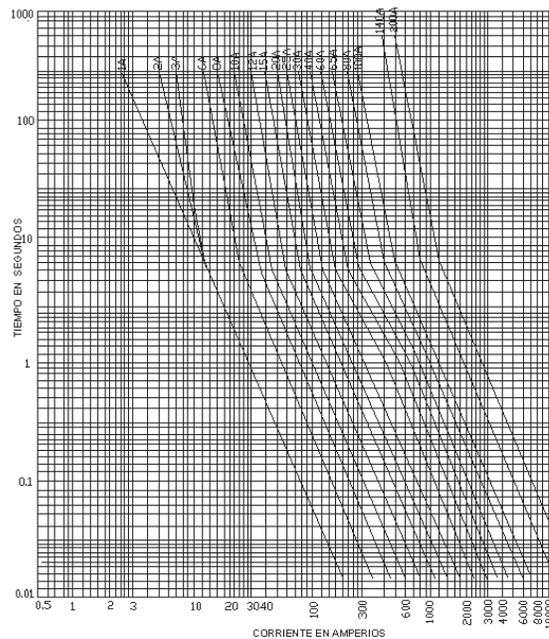


Fuente: S y C Electric Company (2020). *Cortacircuitos Fusible Tipo XS*. Consulta: octubre 2020, Recuperado de: <https://www.sandc.com/es/productos-y-servicios/productos/cortacircuito-fusible-tipo-xs/>

El funcionamiento del fusible es por medio de un filamento o una lámina que tiene como característica un bajo punto de fusión, al cual al momento de superar una corriente eléctrica que es conducida por el filamento, lo cual se calienta y puede llegar a fundirse, dejando el circuito sin paso de corriente.

Cada fusible tiene una curva de fusión distinta, una característica de conducción de corriente distinta, por lo cual es muy importante en la red de distribución eléctrica conocer cada uno de los comportamientos de los ramales que conforman una red de distribución eléctrica. A esto se le llama coordinación de protecciones y es basado completamente por las corrientes que son conducidas en cada ramal (Pappu, Carvalho y Pardalos, 2013).

Figura 7. **Representación de las curvas tipo de los fusibles tipo T, correspondiente a los tiempos mínimos de fusión**

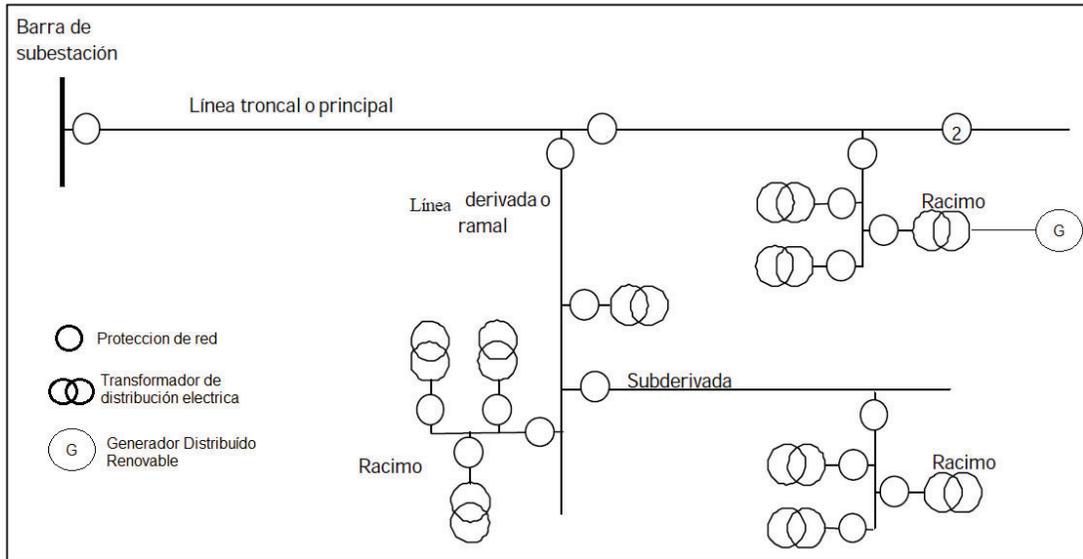


Fuente: Ramírez (2004). *Redes de Distribución de Energía Parte 4*. Consulta: octubre 2020.

Recuperado de: https://www.researchgate.net/figure/FIGURA-1215-Curvas-caracteristicas-t-l-de-despeje-maximo-para-fusibles-tipo-T-de-la_fig6_281538416

Al conectar un generador distribuido renovable y el cliente no consume dicha potencia, por ejemplo, en un día que no hay nadie en casa, la corriente eléctrica puede viajar hacia la red de distribución y generar una descoordinación de las protecciones de red de la distribuidora local.

Figura 8. **Representación gráfica de una red de distribución eléctrica con sus protecciones**



Fuente: elaboración propia.

7.6.2. Por generación en isla

Una de las consecuencias que puede suscitarse en una generación distribuida intermitente es la de alimentar un pequeño sector de red de baja tensión llamado generación en isla, esto al tener una falla de parte de la distribuidora local, el generador mantiene su alimentación a la red si es un horario de alta incidencia solar. Esto puede provocar que al momento de la coordinación para recuperar el sector por parte de la distribuidora falle, esto provocado por la corriente de retorno enviada por la generación distribuida (Mahmoud y Al-Sunni, 2015).

Por lo general, la distribuidora local no puede permitir que la generación distribuida entregue energía a la red del área en un momento de falla, por lo que

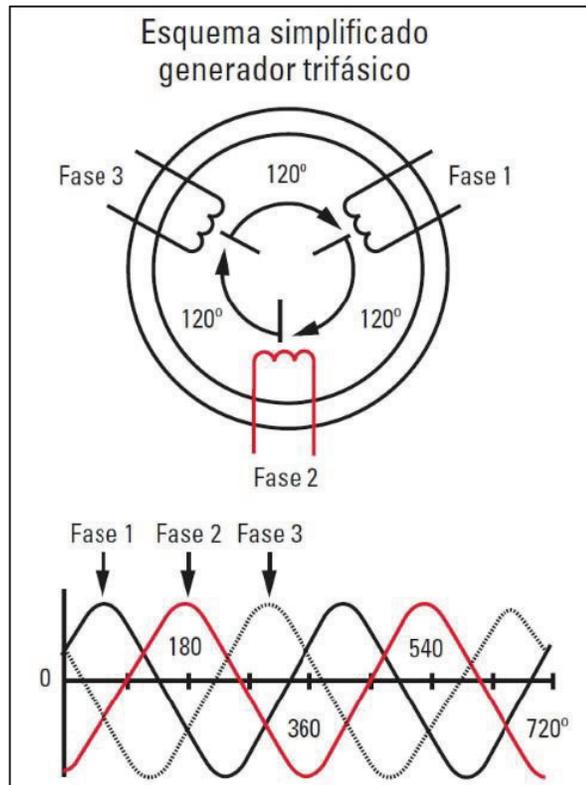
es necesario controlar el tipo de protección que el cliente tiene en su punto de acometida y su medición (Bacallao y de las Casas, 2011).

Normalmente la recuperación de un circuito se realiza por un recierre automático por parte de la distribuidora local, al tener corrientes de retorno, la protección se activa de nuevo, provocando que la reconexión pueda atrasarse al realizar maniobras locales por el personal autorizado de la distribuidora. Esto en alguno momento puede ocasionar sanciones por la falta de energía a los usuarios que están alrededor.

7.6.3. Por calidad de la energía

El sistema eléctrico interconectado debe tener una sincronización en el que mantiene una frecuencia de 60 Hertz, esto debido a la forma de onda que se compone la corriente eléctrica, una onda senoidal, que se repite 60 veces por segundo. Esto se debe al movimiento mecánico de un rotor de un generador, la cual da sesenta vueltas en un solo segundo, cuando su rotor es de dos polos (Chakraborty y Ilić 2012).

Figura 9. **Representación mecánica y gráfica de la generación eléctrica**

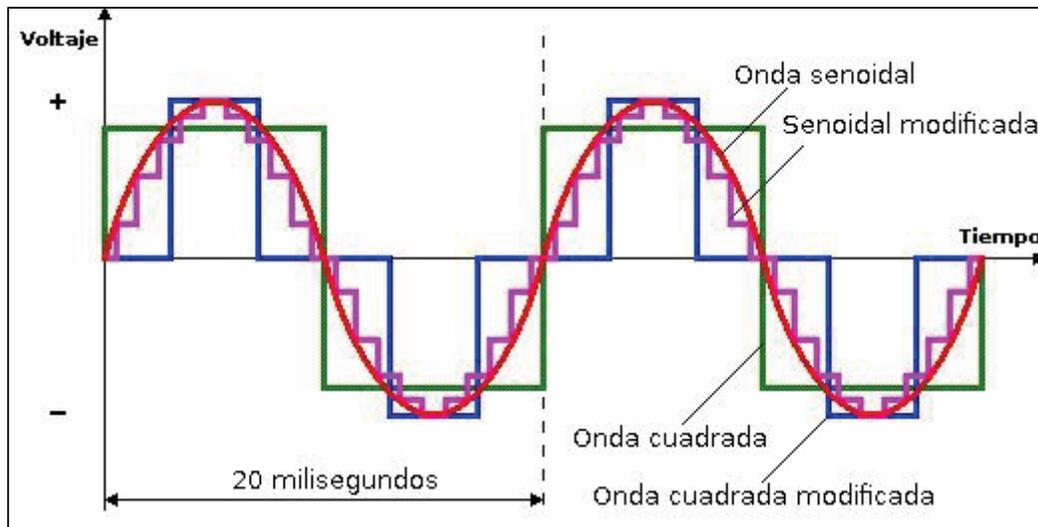


Fuente: RedUSERS, (2014). *La Generación Trifásica*. Consulta: octubre de 2020. Recuperado de: <http://www.redusers.com/noticias/la.generacion-trifasica/>

Con las nuevas tecnologías, por ejemplo, la generación solar, el movimiento de rotación para la generación eléctrica no existe, por lo que la onda senoidal se debe construir por medio de la electrónica. Los paneles solares que transforman la luz en energía entregan una corriente continua, normalmente entre 12 a 48 voltios de amplitud, por lo que la corriente eléctrica debe pasar por un inversor que reconstruye una onda senoidal y pueda ser usada por los aparatos que normalmente se tienen en el hogar.

El problema principal es cuando los inversores no pueden construir una onda senoidal perfecta, lo cual inyectan a la red del cliente y de la distribuidora local una onda muy deformada a lo que normalmente tiene la red. Esto provoca que existan efectos adversos en la red.

Figura 10. **Representación gráfica de ondas senoidales creadas por la electrónica**



Fuente: Leaf Energy, (2020). *Preguntas acerca de Paneles y Sistemas Solares*, Consulta: octubre 2020. Recuperado de: <https://panelessolares.pe/preguntas.php>

De acuerdo con Bazurto, Zúñiga, Echeverry y Lozano (2016) los impactos negativos en la calidad de la energía consisten en la inyección de armónicos a la red, lo cual provoca calentamiento en los transformadores de distribución de la red y reducción en su vida útil.

Los armónicos en la red son provocados por las ondas sinusoidales anormales, lo cual, al tener una onda deformada, hay puntos en donde la tensión se suma por la mala sincronización, y provoca que existan voltajes altos en la

red, mayores a los 120 voltios que debe tener una red de baja tensión, lo que puede ocasionar mal funcionamiento y fallos en los equipos eléctricos del hogar.

7.6.4. Por coordinación de mantenimientos

El mantenimiento de red por parte de la distribuidora local es muy importante para mantener la calidad del suministro y la calidad del producto, por lo que cada cierto tiempo se debe realizar trabajos de mantenimiento en la red, o incluso en desconexiones normales para la instalación de nuevos usuarios a la red donde es necesaria la suspensión del servicio eléctrico en el sector de trabajo.

Si un generador distribuido no tiene las protecciones necesarias para desconectarse de la red eléctrica cuando se encuentra fuera de servicio, realiza lo de un generador en isla, lo cual puede ocasionar que el fluido eléctrico alcance la línea que está siendo manipulada por la empresa distribuidora local y ocasionar un accidente.

7.7. Beneficios de los consumidores

Según Magdi (2015), los sistemas de generación distribuida ayudaran a los clientes de una red de distribución a ahorrar dinero. Los consumidores pueden tener la opción de controlar su consumo por medio de medidores inteligentes. Esto ayudará a los clientes a conocer con más detalle el consumo diario que tiene su red interna, y tendrá una tendencia a mejorar eficientemente el uso de energía eléctrica.

Esto puede provocar un efecto en toda la red donde puede llegar a normalizar una curva de demanda eléctrica que en horas pico es una generación marginal bastante cara, y en horas valle el costo de generación cae

considerablemente. Si es posible que dicha curva de demanda pueda ser lo más plana posible, la generación se puede planificar de una manera óptima, al utilizar la tecnología más barata disponible y evitar el encarecimiento de la generación en las horas de mayor demanda del país.

7.7.1. Monitoreo de consumo

El monitoreo de consumo es uno de los beneficios que el cliente puede invertir al tratar de observar el comportamiento que mantiene la autoproducción, y la necesidad de tener un seguimiento al flujo de energía saliente a la red de la distribuidora local como también el flujo que ingresa de parte de la distribuidora, realizando un balance de energía final. El monitorear el consumo energético mensual puede facilitar cambiar una rutina de consumo y reducir sus máximos. Esto genera una mejor eficiencia energética (Momoh, 2018).

Hoy en día la monitorización se puede realizar fácilmente desde un teléfono inteligente, ya que los medidores avanzados tienen la opción de conectarse a una red de internet y compartir la información obtenida del consumo eléctrico con el usuario final.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. DEFINICIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA INTERMITENTE

1.1. Paneles Solares

1.1.1. Radiación solar en Guatemala

1.1.2. Sistemas tradicionales

1.1.3. Banco de baterías para sistemas tradicionales

1.1.4. Configuración de conexión para el alcance de potencia necesario

1.2. Red automática de generación

1.2.1. Principio de funcionamiento

1.2.2. Tipos de conexiones

1.2.3. Protecciones de red

1.3. Generación intermitente

1.3.1. Conceptos básicos

1.3.2. Factores de afectación en la red

1.3.3. Red de distribución eléctrica y sus componentes

- 1.3.3.1. Banco de transformadores
 - 1.3.3.2. Fusibles de protección
 - 1.3.3.3. Sistemas automáticos de protección
 - 1.4. Sincronización a la red eléctrica trifásica de baja tensión
 - 1.4.1. Pruebas con carga resistiva
 - 1.4.2. Sincronización a la red de distribución eléctrica
- 2. RENTABILIDAD DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA INTERMITENTE
 - 2.1. Inversiones iniciales
 - 2.2. Viabilidad del proyecto
 - 2.2.1. Tipo de proyectos dependiendo de la carga
 - 2.2.2. Corriente circulante en la red de distribución
 - 2.3. Autoproductores
 - 2.4. Cálculo de retorno de la inversión
- 3. EFECTOS Y TRAZABILIDAD DE LA GENERACIÓN INTERMITENTE
 - 3.1. Tarifas de consumo
 - 3.1.1. Tarifa social
 - 3.1.2. Tarifa no social
 - 3.1.3. Tarifa con demanda
 - 3.1.4. Gran usuario
 - 3.2. Cambios de tarifa
 - 3.3. Eficiencia de consumo en horario diurno y nocturno
- 4. MONITORIZACIÓN DE LA GENERACIÓN INTERMITENTE
 - 4.1. Monitoreo de consumo
 - 4.1.1. Tipos de medidores para monitoreo
 - 4.2. Viabilidad del monitoreo

4.3. Beneficios obtenidos con el proyecto dependiendo de la potencia generada

4.4. Red inteligente

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

El problema es generado por la actualización tecnológica en la red de distribución eléctrica la cual tiene presencia en el perímetro del municipio de Amatlán en un voltaje de 13.8KV. Cuando se instala una generación distribuida por parte del cliente, mantiene un autoconsumo de energía, sin embargo, el cliente en un horario no establecido no consume la totalidad de la energía generada, al enviar dicha energía a la red de distribución.

9.1. Características del estudio

El enfoque del estudio propuesto es cualitativo ya que se debe plantear la mejora de la eficiencia en el autoconsumo de la generación distribuida solar en el área de baja tensión.

El alcance es explicativo dado que se buscará la mejor configuración y eficiencia del sistema para evitar pérdidas de lado de la distribuidora y del cliente, al aprovechar al máximo la generación distribuida renovable solar.

El diseño adoptado será no experimental, pues la información del impacto de la generación distribuida conectada a las redes de distribución eléctrica 13.8KV en el municipio de Amatlán se analizará en su estado original sin ninguna manipulación; además será transversal pues se estudiará la eficiencia de la generación distribuida y su impacto en una red que no está planificada para obtener generación distribuida, en la cual, las protecciones de la red de distribución juegan un papel muy importante para mantener un servicio óptimo hacia la población.

9.2. Unidades de análisis

La población en estudio será los generadores distribuidos renovables, la cual se encuentra dividida en subpoblaciones dadas por los paneles solares y las protecciones de red, de la cual se extraerán muestras de forma cuantitativa, que serán estudiadas en su totalidad.

9.3. Variables

A continuación, se presentan las variables de estudio que se han derivado de cada una de las preguntas planteadas anteriormente.

- ¿Cuáles son los problemas que podrían darse por la introducción de la generación distribuida intermitente por medio de paneles solares conectados a la red de baja tensión 120v/240v, en el municipio de Amatitlán?

Tabla I. Definición de variable pregunta auxiliar 1

Variable	Propiedad	Uso	Nivel de medición
Generadores distribuidos instalados	Numérica continua	Manipulable	Nominal
Cantidad de Transformadores afectados	Numérica continua	Observable	Nominal

Fuente: elaboración propia.

- ¿Cuál es la rentabilidad de la generación distribuida intermitente, al tomar en cuenta los aspectos de la inversión inicial, en base al consumo energético del autoproducer y la tarifa eléctrica actual de la distribuidora autorizada del área del municipio de Amatitlán?

Tabla II. **Definición de variable pregunta auxiliar 2**

Variable	Propiedad	Uso	Nivel de medición
Costo de inversión	Numérica continua	Manipulable	Nominal
Tarifa Eléctrica	Numérica continua	Observable	Nominal

Fuente: elaboración propia.

- ¿Cuáles son los efectos y trazabilidad de la energía eléctrica en horas de alta generación y el consumo de los clientes en el municipio de Amatitlán?

Tabla III. **Definición de variable pregunta auxiliar 3**

Variable	Propiedad	Uso	Nivel de medición
Protecciones de red	Numérica continua	Manipulable	Nominal
Líneas de distribución	Numérica continua	Observable	Nominal

Fuente: elaboración propia.

- ¿Qué beneficios se obtienen de un monitoreo de consumo eléctrico descentralizado por parte del cliente autoprodutor con excedentes de energía?

Tabla IV. **Definición de variable pregunta auxiliar 4**

Variable	Propiedad	Uso	Nivel de medición
Clientes autoconsumidores	Numérica continua	Observable	Nominal
Medidores bidireccionales	Numérica continua	Manipulable	Nominal

Fuente: elaboración propia.

En resumen, se defina cada una de las variables en estudio, al mencionar su definición teórica y operativa a continuación:

Tabla V. **Definición de variables**

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Generadores Distribuidos	Los paneles solares utilizan los rayos del sol para generar energía por medio de efecto fotoeléctrico.	Se medirán todos los paneles solares propuestos en un área de la empresa distribuidora.
Transformadores	Máquina estática que tiene la capacidad de cambiar el nivel de tensión por medio del flujo magnético.	Se medirá la cantidad de unidades que pueden ser afectados por la corriente de retorno.
Costo de Inversión	Costo monetario para la compra de las utilidades técnicas de puesta en servicio de una generadora renovable.	Se sumará el costo de los proyectos de generación renovable en los clientes autoprodutores.
Tarifa Eléctrica	Costo de la energía eléctrica propuesta por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica para el consumo en KWh-mes.	Se medirá con respecto a la inversión inicial y su recuperación monetaria del proyecto.
Protecciones de red	Son equipos que evitan sobrecalentamientos o sobretensiones en los transformadores y generadores distribuidos.	Se medirá la cantidad propuesta para que el servicio eléctrico en la red sea el óptimo.

Continuación de tabla V.

Líneas de distribución	Son cables de distribución de energía, la cual son calculados para llevar cierta corriente eléctrica.	Se cualificará las características del cable para mantener un flujo de corriente sin dañar su estructura.
Medidores bidireccionales	Son aparatos que miden el flujo de energía que pasa a través de ellos, logrando medir el flujo de corriente en ambas direcciones.	Se tomarán en cuenta en cada uno de los proyectos de generación distribuido propuesto.
Clientes autoconsumidores	Las personas que instalan generación distribuida y pueden llegar a suministrar energía de retorno a la red eléctrica	Se cuantificarán los clientes potenciales que se conectarán a la red de distribución.

Fuente: elaboración propia.

9.4. Fases del estudio

Se presentan las fases en la que se realizará el estudio del impacto de la generación distribuida intermitente a la red de distribución eléctrica existente.

9.4.1. Fase 1

En dicha fase se realizará la investigación y consultas a fuentes bibliográficas que tienen relación con el tema de generación distribuida intermitente, juntamente con casos implementados o casos de éxito en diferentes países que tomaron la iniciativa por la generación limpia y mejorar el parque energético de Guatemala.

9.4.2. Fase 2

Se pretende determinar el impacto que una generación distribuida intermitente ocasionará sobre una red de distribución eléctrica en media tensión de 13,8KV al sector de la red de distribución eléctrica de Amatitlán, será

necesario calcular las potencias máximas de generación de cada uno de los generadores conectados a la red.

La herramienta que se utilizará en este caso serán ecuaciones de energía en base a la eficiencia que existe hoy en día en el mercado de los paneles solares. Esto nos dará una idea de la corriente eléctrica que en un momento de mayor generación puede suministrar a la red de distribución eléctrica.

9.4.3. Fase 3

En esta fase de estudio se verificarán los factores que inciden sobre la red de la distribuidora local al conectar varios sistemas de generación renovable intermitente.

9.4.4. Fase 4

El estudio se enfoca en analizar la trazabilidad del consumo en base a cada generador distribuido renovable conectado a la red. El consumo de cada cliente puede determinarse por medio de la consulta a la distribuidora autorizada del área de Amatitlán, donde se obtendrán los datos promedio de consumo de cada cliente a estudiar.

Debe determinarse un efecto de mayor consumo si la generación distribuida renovable está conectada a la red de baja tensión de la distribuidora local, la cual provocará que el cliente se sienta más cómodo y utilizará mayor energía sin tener un control del consumo diario.

9.4.5. Fase 5

Determinar el uso de medición inteligente en la red de los clientes con generación distribuida intermitente para balancear el consumo agravado por la comodidad y confianza de tener su propia generación conectada a la red de baja tensión de la distribuidora local, la energía no consumida puede retornar a la red del distribuidor local.

Los medidores inteligentes proporcionarán información de consumo diario para determinar una curva de consumo de cada cliente.

9.5. Resultados esperados

Con base en la investigación, los objetivos y las diferentes fases de estudio del trabajo de graduación que se realizará, se esperan obtener los siguientes resultados en las diferentes variables que estarán en estudio

- El impacto provocado por la generación distribuida renovable en una red de distribución eléctrica, si no se tiene un sistema de protección eficiente.
- Encarecimiento del VAD por parte de la distribuidora local por el fortalecimiento de la red existente.
- Incremento en el uso de la energía en temporadas lluviosas cuando la generación distribuida tiene poca eficiencia.
- Incremento en la regulación de media tensión al recibir energía de la generación distribuida intermitente.

- Control eficiente en el consumo de energía eléctrica por parte del cliente de la distribuidora autorizada.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

En este apartado se indicará la técnica de muestreo para usar los datos requeridos para determinar el impacto del uso de la generación distribuida intermitente en una red de distribución eléctrica y realizar simulaciones de la inyección de energía por parte de los generadores distribuidos renovables en el área de Amatitlán.

Muestreo no probabilístico

Se realizará este tipo de muestreo como una técnica que permitirá realizar la selección de muestras basado en un criterio subjetivo y no en un criterio de selección aleatoria. Debido a que el estudio por realizar posee un alcance exploratorio, este tipo de muestreo se adaptará a los requerimientos necesarios para la investigación, ya que es una técnica menos estricta y obtención de la información será más rápida.

En este caso de estudio el muestreo se basará en la cantidad de clientes potenciales para la instalación de una generación distribuida renovable a base de paneles solares, en varios sectores de la red del distribuidor del área. Esto generará y alimentará las siguientes variables.

- Transformadores afectados
- Cantidad de paneles solares por cliente dependiendo del consumo
- Corriente máxima de inyección a la red por cliente
- Demanda máxima por cliente
- Recursos energéticos en general

Análisis univariado

El análisis de cada una de las variables por estudiar será de tipo univariado, ya que estas serán estudiadas por separado y para todos los casos su nivel de medición será de razón. Se hace la salvedad que, para el caso de la tercera y cuarta pregunta auxiliar de investigación, la variable demanda de electricidad de exportación, será tratada y estudiada para obtener respuestas a ambas preguntas, pero por ser la misma variable, su análisis continuará siendo univariado.

Análisis aritmético

En matemática, el símbolo griego “ Σ ” en mayúscula se utiliza para indicar sumatoria de datos donde:

$$\sum_1^n x_i = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \dots x_n$$

Donde:

- x: Es un valor de la medición.
- i: Es un índice que varía de “1 a n”,
- n: Es la cantidad de la muestra.

Los resultados que se obtendrán, los datos programados y reales, además de las comparaciones correspondientes, también serán analizados gráficamente haciendo uso de Microsoft Excel, herramienta con la que también se realizarán las operaciones aritméticas y de estadística descriptiva a emplear.

Simulación de flujos de potencia en redes de distribución

El análisis dinámico del comportamiento de la red de distribución eléctrica será realizado en simulaciones por medio de un software especializado, para este caso el software NEPLAN cumple con las características para dicha simulación.

Este caso de análisis por simulación es muy importante para responder las diferentes preguntas y objetivos dados planteados en trabajo de diseño de investigación, y llegar a las conclusiones. Para responder a la pregunta número uno y tres, que hace referencia a los impactos y la trazabilidad de la generación eléctrica en una red de distribución en el área del municipio de Amatlán.

11. CRONOGRAMA

Tabla VI. Cronograma de actividades

PLAN DE ACCIÓN	Meses		Semanas											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
ACTIVIDADES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Elaboración del Protocolo 3er trimestre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Elaboración del contenido	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Consultas asesor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Definición de capítulos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Investigación del marco teórico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Revisión de protocolo asesor.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Aprobación de punto de tesis.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Investigación de capítulo 1.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Elaboración de contenido	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Investigación de capítulo 2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Elaboración de contenido	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Investigación de capítulo 3.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Elaboración de contenido	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Consultas asesor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Investigación de capítulo 4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Elaboración de contenido	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Consultas asesor y revisión	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Elaboración del capítulo 5 y anexos.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Análisis de datos cuantitativos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Elaboración de conclusiones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Revisión preliminar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Corrección de la revisión de tesis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Aprobación de tesis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		

Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El estudio propuesto se considera factible a realizar, debido a que los recursos necesarios para su elaboración serán proporcionados por el investigador, en su mayoría, y los recursos e información que dependen del distribuidor local de energía eléctrica serán solicitados y proporcionados, debido a que el investigador tiene una relación laboral con dicha entidad.

Tabla VII. **Recursos necesarios**

Recurso	Disponibilidad del recurso	Fuente de financiamiento	Cuantificación
Humano	Investigador, y Asesor	Propia	2 persona
Financiero	Gastos de impresiones	Investigador	La necesaria
Tecnológico	Software para cálculo y Office 365	Distribuidora	Herramientas de office y software para cálculo de flujo
Acceso a la información	Información pública	No aplica	La necesaria
	Información Privada	Relación laboral con entidad.	La necesaria
Permisos	Datos de la distribuidora eléctrica local	Distribuidora de energía eléctrica	Los necesarios
Equipo	Computadora portátil	Propia	1 computadora de escritorio
Infraestructura	Oficina	Propia	1 oficina
Imprevistos	Se consideran todo tipo de gastos adicionales	Investigador	5 %

Fuente: elaboración propia

A continuación, se detallará el valor económico de los recursos planteados con anterioridad, que será tomado como referencia ya que muchos de estos recursos no representarán un costo adicional para el investigador o a la entidad de distribución eléctrica.

Tabla VIII. Valorización económica

Item	Descripción	Costo unidad	Unidad	Total	Porcentaje	Financiamiento	Tipo
1	Gastos Investigador	Q 250.00	32 semanas	Q 8,000.00	24.66%	Valor teórico	Recurso humano
2	Honorarios Asesor	Q 500.00	4 semanas	Q 2,000.00	6.16%	Valor teórico	Recurso humano
3	Equipo de computo	Q 100.00	32 semanas	Q 3,200.00	9.86%	Propio	Suministros
4	Software	Q 12,000.00	1 uso	Q 10,000.00	30.82%	Propio y entidad privada	Suministros
5	Internet	Q 50.00	32 semanas	Q 1,600.00	4.93%	Propio	Suministros
6	Energia Electrica	Q 1.25	200 horas	Q 250.00	0.77%	Propio	Suministros
7	Impresor y tinta	Q 0.15	1000 hojas	Q 150.00	0.46%	Propio	Útiles de oficina
8	Papel impresora	Q 0.10	1000 hojas	Q 100.00	0.31%	Propio	Útiles de oficina
9	Vehiculo	Q 300.00	8 viajes	Q 2,400.00	7.40%	Propio	Transporte
10	Combustible	Q 200.00	8 viajes	Q 1,600.00	4.93%	Propio	Transporte
11	Viáticos	Q 200.00	8 viajes	Q 1,600.00	4.93%	Propio	Viáticos
	Subtotal			Q 30,900.00			
12	Imprevistos		Varios	Q 1,545.00	4.76%	Propio	Varios
	Total			Q 32,445.00			

Fuente: elaboración propia.

13. REFERENCIAS

1. Bacallao, E. y de las Casas, M., (2011). *Consideraciones sobre la protección en la interconexión de la generación distribuida al sistema eléctrico de potencia*. La Habana, Cuba: Ingeniería Energética, (Vol. XXXII). Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329127746004>
2. Bazurto, A., Zúñiga, J., Echeverry, D. y Lozano, C. (2016). *Perspectiva del transformador de distribución en redes eléctricas con alta penetración de generación distribuida y vehículos eléctricos*. Bogotá, Colombia: Ciencia e Ingeniería Neogranadina, doi: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1710>
3. Chakraborty, A., y Ilić, M. (2012). *Control and Optimization Methods for Electric Smart Grids*. Berlin, Germany: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1605-0>
4. Colmenar, A., Díaz, D., Collado, E. y Castro, M. (2015). *Generación distribuida, autoconsumo y redes inteligentes*. Madrid, España: UNED, Universidad Nacional de Educación a Distancia. Recuperado de: www.amazon.com
5. Dirks, J., Gorrissen, W., Hathaway, J. y Skorski, D. (2014). *Impacts of climate change on energy consumption and peak demand in buildings* *Impactos del cambio climático en el consumo de energía*

y la demanda máxima en edificios. Washington, USA. Editorial: Elsevier, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.081>

6. Flavin, C., Gonzalez, M., Majano, A., Ochs, A., da Rocha, M. y Tagwerker, P. (2014). *Study on the Development of the Renewable Energy Market in Latin America and the Caribbean*. New York, USA: Inter-American Development Bank. Recuperado de: www.iadb.org
7. Goetzberger, A. y Hoffmann, V. (2005). *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg New York. Recuperado de www.amazon.com
8. Keyhani, A. y Marwali, M. (2012). *Smart Power Grids. Heidelberg*. Germany: Springer-Verlag. Recuperado de www.amazon.com
9. Mahmoud, M. y Al-Sunni, F. (2015). *Control and Optimization of Distributed Generation Systems*. Dhahran, Saudi Arabia Springer International Publishing Switzerland. Recuperado de www.amazon.com
10. Meng, J. (2003). *A distributed power generation communication system*. In: Electrical and Computer Engineering, Canadian Conference. 2003 doi: [10.1109/CCECE.2003.1226443](https://doi.org/10.1109/CCECE.2003.1226443)
11. Momoh, J. (2018). *Energy Processing and Smart Grid*. New Jersey, USA. IEEE Press Editorial Board. Recuperado de www.amazon.com
12. Pappu, V., Carvalho, C., Pardalos, P. (2013). *Optimization and Security Challenges in Smart Power Grids*. Florida, USA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Recuperado de www.amazon.com

13. Samaniego, J., (2009). *Cambio climático y desarrollo en América Latina; Santiago: CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe)*. Recuperado de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/3640-cambio-climatico-desarrollo-america-latina-caribe-resena>
14. Sánchez, L. y Reyes, O. (2015). *Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y el Caribe: una revisión general*. Santiago, Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Recuperado de www.cepal.org
15. Smolenski, R. (2012). *Conducted Electromagnetic Interference (EMI) in Smart Grids*. Zielona Góra, Poland. Springer-Verlag London 2012. Recuperado de www.amazon.com

