



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

**VIABILIDAD DE MICRORREDES PARA AUMENTAR LA ELECTRIFICACIÓN RURAL Y SU
PARTICIPACIÓN FUTURA EN EL MERCADO ELÉCTRICO DE GUATEMALA**

Ing. Ernesto Rafael Estrada Quiñónez
Asesorado por el MBA. Ing. Lester Morales Ruiz

Guatemala, junio de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**VIABILIDAD DE MICRORREDES PARA AUMENTAR LA ELECTRIFICACIÓN RURAL Y SU
PARTICIPACIÓN FUTURA EN EL MERCADO ELÉCTRICO DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. ERNESTO RAFAEL ESTRADA QUIÑÓNEZ
ASESORADO POR EL MBA. ING. LESTER MORALES RUIZ

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

GUATEMALA, JUNIO DE 2023

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. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Alvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. René Roberto Castellanos Moreira
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:

VIABILIDAD DE MICRORREDES PARA AUMENTAR LA ELECTRIFICACIÓN RURAL Y SU PARTICIPACIÓN FUTURA EN EL MERCADO ELÉCTRICO DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de estudios de Postgrado, con fecha 15 de noviembre 2021.



Ing. Ernesto Rafael Estrada Quiñónez

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

LNG.DECANATO.OI.528.2023

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 Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **VIABILIDAD DE MICRORREDES PARA AUMENTAR LA ELECTRIFICACIÓN RURAL Y SU PARTICIPACIÓN FUTURA EN EL MERCADO ELÉCTRICO DE GUATEMALA**, presentado por: **Ing. Ernesto Rafael Estrada Quiñónez**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Aurelia Ariabela Cordova Estrada



Decana

Guatemala, junio de 2023

AACE/gaoc



EEPFI-1642-2022

Guatemala, 7 de noviembre de 2022

Profesional

Ernesto Rafael Estrada Quiñónez

Carné: 200630126

Maestría En Gestión De Mercados Eléctricos

Regulados

Distinguido Profesional Estrada Quiñónez

De manera atenta hago constar que de acuerdo con la aprobación del coordinador de maestría y docente-revisor doy el aval a su Informe Final y Artículo Científico titulado:

"VIABILIDAD DE MICRORREDES

PARA AUMENTAR LA ELECTRIFICACIÓN RURAL Y SU PARTICIPACIÓN FUTURA

EN EL MERCADO

ELECTRICO DE GUATEMALA".

Con base en la evaluación realizada hago constar la originalidad, calidad, coherencia según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobados por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Cumpliendo tanto en su estructura como en su contenido, **por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.**

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


MSc. Ing. Edgar Darío Alvarez Coti



Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 7 de noviembre de 2022

M.A. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **VIABILIDAD DE MICRORREDES PARA AUMENTAR LA ELECTRIFICACIÓN RURAL Y SU PARTICIPACIÓN FUTURA EN EL MERCADO**

ELÉCTRICO DE GUATEMALA del estudiante **Ernesto Rafael Estrada Quiñónez** quien se identifica con número de carné **200630126** del programa de Maestría En Gestión De Mercados Electricos Regulados.

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

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



Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepique
Coordinador
Maestría En Gestión De Mercados Electricos Regulados
Escuela de Estudios de Postgrado

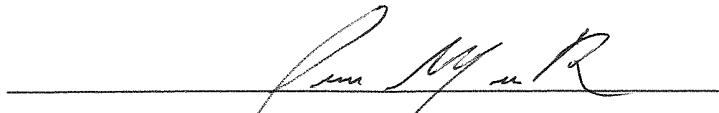
Guatemala, 7 de noviembre de 2022

M.A. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: "**VIABILIDAD DE MICRORREDES PARA AUMENTAR LA ELECTRIFICACIÓN RURAL Y SU PARTICIPACIÓN FUTURA EN EL MERCADO ELÉCTRICO DE GUATEMALA**" del estudiante **Ernesto Rafael Estrada Quiñónez** del programa de **Maestría En Gestión De Mercados Eléctricos Regulados** identificado(a) con número de carné 200630126.

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


Mtro. Ing. Lester Guillermo Morales Ruiz
Colegiado No. 8762
Asesor de Tesis



Lester Guillermo Morales Ruiz
Ingeniero Eléctrico
Col. 8762

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Jorge Estrada y Dora Quiñónez, por su apoyo incondicional, cariño e instrucción en toda mi formación personal, académica, cultural y social.

Mis hermanos

Pedro, Favio, Jorge Athyla y Marcos Estrada, por su apoyo y compañía en las diferentes etapas de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser de las instituciones en Guatemala una de las pocas dedicada en promover el conocimiento y ayudar al desarrollo de la población.
Mis amigos	Que han sido un apoyo y una motivación para continuar mejorando y desarrollándose personal y profesionalmente.
Catedráticos de la Escuela de estudios de Postgrado	A los ingenieros y catedráticos de la escuela de estudios de Postgrado, que por medio de sus clases compartieron su conocimiento y motivaron a los estudiantes a aprender, adquirir nuevos conocimientos y seguir desarrollándose como profesionales.
El Ingeniero Lester Morales	Por su apoyo y guía para el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XXI
OBJETIVOS	XXV
RESUMEN MARCO METODOLÓGICO	XXVII
INTRODUCCIÓN	XXIX
1. MARCO REFERENCIAL	1
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Electrificación rural en Guatemala	9
2.1.1. Estado de la electrificación rural en Guatemala.....	9
2.1.2. Desafío de la electrificación rural en Guatemala	18
2.2. Generación distribuida	21
2.2.1. Generación mediante paneles solares	23
2.2.2. Almacenamiento de energía en baterías	25
2.2.3. Sistema de gestión de baterías	27
2.2.4. Inversores de forma de onda	27
2.3. Microrredes	29
2.4. Análisis económico del uso de microrredes para la electrificación rural	34
2.4.1. Electrificación rural por medio de generación distribuida y análisis económico	35

2.4.2.	Impacto social de la electrificación por medio de microrredes	37
2.4.3.	Desafíos socioeconómicos para la implementación de las microrredes en el área rural	38
2.5.	Microrredes y el Mercado Mayorista	39
2.5.1.	Marco regulatorio	39
2.5.2.	Normativa técnica de generación distribuida Renovable y usuarios autoproductores con excedentes de energía.....	41
3.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	45
3.1.	Características del estudio	45
3.1.1.	Diseño	45
3.1.2.	Enfoque	45
3.1.3.	Alcance.....	46
3.1.4.	Unidad de análisis	46
3.2.	Variables	48
3.3.	Fases de la investigación	49
3.3.1.	Fase 1: definición técnica del modelo de microrred como propuesta para el uso en áreas rurales.	49
3.3.2.	Fase 2: definición de la población de muestra y búsqueda de datos	61
3.3.3.	Fase 3: cuantificación de costos de la microrred propuesta y definición de la inversión.....	66
3.3.4.	Fase 4: análisis técnico-económico de la solución.	69

3.3.5.	Fase 5: comparación del modelo con otro previendo la conexión a la red de distribución e interacción con el mercado eléctrico.....	69
3.4.	Técnicas de análisis de la información	73
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	75
4.1.	Modelo de microrred.....	75
4.2.	Beneficios a corto/mediano plazo de implementar microrredes en áreas rurales en Guatemala	77
4.3.	Costos asociados a la implementación de microrredes en áreas rurales en Guatemala	79
4.4.	Viabilidad de incorporación de una microrred al mercado Mayorista Guatemalteco.....	83
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	85
5.1.	Modelo propuesto de microrred	85
5.2.	Beneficios a corto/mediano plazo de implementar microrredes en áreas rurales en Guatemala	86
5.3.	Costos asociados a la implementación de microrredes en áreas rurales en Guatemala	88
5.4.	Viabilidad de incorporación de una microrred al mercado Mayorista Guatemalteco.....	90
	CONCLUSIONES	93
	RECOMENDACIONES	95
	REFERENCIAS	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Porcentaje de cobertura eléctrica a nivel regional año 2016.....	11
2.	Porcentaje de cobertura eléctrica a nivel regional año 2020.....	11
3.	Hogares con servicio básico de electricidad.....	12
4.	Hogares con servicio básico de electricidad (urbano).....	13
5.	Hogares con servicio básico de electricidad (rural).....	14
6.	Porcentaje de electrificación por departamento.	15
7.	Estado de la electrificación en el departamento de Alta Verapaz.....	16
8.	Estado de la electrificación en el departamento de Baja Verapaz.....	16
9.	Estado de la electrificación en el departamento de Izabal.	17
10.	Estado de la electrificación en el departamento de Petén.....	17
11.	Estado de la electrificación en el departamento de Quiché.....	18
12.	Microrred con arquitectura DGDSA.....	32
13.	Mapa con la ubicación del municipio de San Pedro carchá, así como sus regiones y límites geográficos.	47
14.	Esquema de un sistema de generación solar con un sistema de almacenamiento.....	51
15.	Diagrama eléctrico de un sistema de generación solar con un sistema de almacenamiento.....	52
16.	Perfil de carga horaria de un poblado genérico.....	57
17.	Perfil de carga horaria de un poblado genérico.....	58
18.	Modelo propuesto de microrred, para implementar en áreas rurales, este tiene generación distribuida, y un sistema de almacenamiento distribuido.....	60

19.	Zonas con poca o nula electrificación en el municipio de San Pedro Carchá.....	62
20.	Distancia en línea recta desde la cabecera municipal de San Pedro Carchá y Sesajal.....	72
21.	Distancia en línea recta desde la cabecera municipal de San Pedro Carchá y Sequixquib.....	73
22.	Modelo propuesto de microrred, para implementar en áreas rurales, este tiene generación distribuida, y un sistema de almacenamiento distribuido.....	76
23.	Ampliación modular de la microrred.....	78
24.	Costo de implementación y mantenimiento de la microrred.....	82

TABLAS

I.	Lineamientos para la instalación de generación distribuida renovable en Guatemala	42
II.	Variables del estudio	48
III.	Consumo medio de una vivienda con un consumo medio-bajo de energía	53
IV.	Consumo medio de una vivienda con un consumo bajo de energía.....	54
V.	Resistencia prevista para los conductores de la microrred	59
VI.	Distribución de población según rangos de edad. Municipio de San Pedro Carchá.....	63
VII.	Costo para la implementación de la microrred.....	67
VIII.	Costo de la microrred en un período de 30 años.	68
IX.	Costo estimado para la construcción de líneas de transmisión en el Municipio de San Pedro Carchá	70
X.	Consumo de potencia y energía previsto en la microrred	75
XI.	Costo para la implementación de la microrred.....	80

XII.	Costo de mantenimiento de la microrred, período de 30 años.....	81
XIII.	Costo estimado para la construcción de líneas de transmisión en el Municipio de San Pedro Carchá.....	84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
\$	Dólar estadounidense
Ft	Flujo de caja en el período t
°C	Grados Celsius
Hz	Hercio
h	Horas
=	Igual que
i	Interés
I	Inversión inicial
km	Kilómetro
kW	Kilovatio
kV	Kilovoltio
>	Mayor que
MW	Megavatio
MWh	Megavatio hora
<	Menor que
m	Metro
mm	Milímetro
n	Número de períodos en los que se recupera la inversión
%	Porcentaje
P	Potencia
Q	Quetzales
Σ	Sumatoria

t

Tiempo

w

Vatio

x

GLOSARIO

Almacenamiento de energía	Sistema encargado de conservar la Energía, evitando así su disipación o pérdida.
AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
Armónicos	Frecuencias múltiples de la frecuencia fundamental de trabajo y cuya amplitud va decreciendo conforme aumenta el múltiplo.
Armónico de orden más bajo (LOH)	Es aquel componente armónico cuya frecuencia se acerca más a la fundamental y su amplitud es mayor o igual al 3 % de la componente fundamental.
CA	Corriente alterna.
CC	Corriente continua.
CD	Corriente directa.

CGCSA	Siglas en inglés para arquitectura de generación centralizada almacenamiento centralizado.
CGDSA	Siglas en inglés para arquitectura de generación centralizada almacenamiento distribuido.
Ciclos de carga/descarga	Es la cantidad de veces que se puede cargar y descargar una batería en su vida útil. Si la descarga es profunda el número de ciclos se reduce, por tanto, su vida útil disminuye.
CNEE	Comisión nacional de energía eléctrica.
DGCSA	Arquitectura de Generación Distribuida Almacenamiento Centralizado.
DGDSA	Arquitectura de Generación Distribuida Almacenamiento Distribuido.
Distorsión armónica Total (THD)	Es una medida de la coincidencia de formas entre una onda y su componente fundamental.

Energía solar fotovoltaica	Energía proveniente del sol, transformada a energía eléctrica por medio del fenómeno fotoeléctrico.
Factor de distorsión (FD)	Indica la cantidad de distorsión armónica que queda en determinada forma de onda después de someter a las armónicas de esa onda a una atenuación de segundo orden, es decir, dividirlas entre n^*n .
Factor de potencia	Está definido como el cociente de la potencia promedio y la potencia aparente.
Fenómeno fotoeléctrico	Fenómeno por el cuál se transforma la energía solar en energía eléctrica.
GDR	Generación distribuida renovable.
Generación distribuida	Es la modalidad de generación de electricidad, producida por unidades de tecnologías de generación con recursos renovables, que se conectan a instalaciones de distribución cuyo

	aporte de potencia neto es inferior o igual a cinco megavatios (5 MW).
IEMA	Exención del Impuesto a las Empresas Mercantiles y Agropecuarias.
INDE	Instituto Nacional de Electrificación.
IVA	Impuesto al valor agregado.
Inversor de forma de onda	Son dispositivos electrónicos encargados de convertir una forma de onda de corriente directa CD en corriente alterna CA.
LGE	Ley General de electricidad.
LVDC	Siglas en inglés para: bajo voltaje en corriente directa.
MEM	Ministerio de Energía y Minas.
Mercado Mayorista	Mercado eléctrico guatemalteco, en el cuál se hacen transacciones económicas por la energía.
Microrred	Red pequeña conformada por generadores interconectados que alimentan cargas que

	generalmente se encuentran aisladas y/o lejanas a redes de distribución.
NCC	Norma de coordinación comercial.
NCO	Norma de coordinación operativa.
NTGDR	Norma técnica de generación distribuida renovable.
NTSD	Norma técnica de sistemas de distribución.
OyM	Operación y mantenimiento.
ODS	Objetivos de desarrollo sostenible.
ONU	Organización de las Naciones Unidas.
Profundidad de descarga	Es el valor en porcentaje de la energía que se puede sacar de un acumulador plenamente cargado en una descarga.
Redes inteligentes	Redes con la capacidad de tomar decisiones para su protección control o reestructura.

Silicio amorfo	Silicio usado para la generación de energía solar, sobrepuerto como una película delgada sobre una hoja de acero, este posee bajo nivel de eficiencia y un bajo costo.
Silicio multicristalino	Silicio usado para la generación de energía solar, compuesta por múltiples cristales de gran pureza, con un alto nivel de eficiencia, color azul intenso y precio más bajo que el monocristalino.
Rendimiento	Es la relación entre la energía que se extrae de un elemento y la energía que ingresa al mismo.
RLGE	Reglamento Ley general de electricidad.
SAT	Superintendencia de Administración Tributaria.
SICA	Sistema de información Centro Americano.
SNI	Sistema Nacional Interconectado.

Sistema aislado	Sistema que no forma parte de otros sistemas (para este caso del sistema nacional Interconectado).
Tensión	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, medida en voltios.
TIR	Tasa interna de retorno.
Transformador	Dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico.
Viabilidad	Que, por sus circunstancias, tiene probabilidades de poderse llevar a cabo.
VPN	Valor presente neto.

RESUMEN

El estado de la electrificación en Guatemala es relativamente bajo, actualmente se encuentra cerca al 90 %. El objetivo de la presente investigación es determinar cómo las microrredes y la generación distribuida pueden aumentar el porcentaje de electrificación rural, ya que estas tienen características técnicas que pueden facilitar la electrificación de zonas aisladas. La importancia de esta investigación es de ámbito social, a pesar de eso no se profundizó en el análisis de los problemas sociales, no obstante, las zonas que requieren más electrificación son de las que presentan mayores problemas sociales. Se propone un modelo de microrred para implementar en el área rural y se analizó la viabilidad de implementación de microrredes para mejorar la electrificación rural dentro del país.

Para esto se definieron los componentes y cuantificaron los costos necesarios para la implementación de una microrred. Con los costos necesarios para la construcción de la microrred, se comparó económicoamente el costo necesario para la implementación de una microrred, con los costos relacionados a la construcción de las líneas de transmisión para electrificar dos poblados, aunque se hace evidente que no es posible comparar de forma directa ambos tipos de proyecto. Se consideró también la posibilidad de la incorporación futura de la microrred al mercado eléctrico nacional, pero lastimosamente esto no es viable a corto plazo y probablemente tampoco a mediano plazo, ya que, para la conexión al sistema nacional, se requiere la infraestructura eléctrica para poder conectar las microrredes con el sistema nacional interconectado, y por los costos encontrados, no es posible que este sea un proyecto para el corto o mediano plazo.

- Palabras clave

Generación distribuida renovable. Almacenamiento distribuido, línea de transmisión.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Contexto general

Institucionalmente el ente responsable por la electrificación rural es el gobierno de Guatemala mediante el Ministerio de Energía y Minas (MEM). Además del MEM hay algunas instituciones que comparten la responsabilidad, como es el caso de la empresa nacional de electrificación INDE. Las empresas de distribución son las encargadas de instalar los elementos necesarios para brindar el servicio, pero si no es económicamente viable no hay un esfuerzo extra de estas instituciones para realizar los proyectos necesarios y lograr dicha electrificación. Por ser estas empresas de origen privado no absorben los costos necesarios para la implementación de los proyectos relacionados con la electrificación rural y esto no ayuda para que sea posible la electrificación de las comunidades más distantes.

Este problema surgió desde la instalación de las primeras plantas de generación, aunque en ese tiempo remoto era evidente que no sería un problema de corto plazo, ya que había aún mucho trabajo por hacer y muchos pasos a dar antes de enfocarse a alcanzar un porcentaje alto de electrificación. Desde hace varios años el INDE ha avanzado con los temas de la electrificación, y esto mejoró al liberar el mercado eléctrico en 1996, pero hasta la fecha a pesar de que existen planes para la electrificación rural, aún no es posible llegar a porcentajes altos de electrificación.

- Descripción del problema

De acuerdo con el plan indicativo de electrificación rural hasta el momento se tiene una electrificación menor a 90 % en Guatemala. Existen puntos ubicados en todo el país sin abastecimiento de energía eléctrica. En los últimos 25 años ha habido grandes esfuerzos por parte del gobierno y algunas instituciones para incrementar el porcentaje de electrificación rural, pero últimamente se percibe que existe un tipo de estancamiento en este tema, y en parte puede deberse a complicaciones técnicas y económicas. El origen de este problema tiene varias aristas; técnicas, económicas, políticas, sociales, entre otros. Lastimosamente la falta de energía eléctrica limita el desarrollo de las personas que viven en áreas rurales y que no cuentan con este servicio. A su vez las entidades públicas que deben velar por la población no parecen estar interesadas en mejorar la cobertura eléctrica, mucho menos las entidades privadas, ya que estas comúnmente necesitan tener un beneficio económico asociado a la aplicación de los proyectos y económicamente estos proyectos no parecen atractivos, y técnicamente requieren algunas consideraciones poco usuales para los sistemas interconectados.

El problema de la cobertura incompleta de electrificación también tuvo su origen en la geografía irregular de los países centroamericanos, por lo que esto representa otros inconvenientes técnicos, que podrían ser atendidos contemplando un sistema aislado, al tener dichos sistemas encontramos nuevamente algunas barreras técnicas y económicas para poder aplicar la solución, ya que se requiere de una fuente de generación relativamente estable, o una combinación con sistemas de almacenamiento de energía, y estas soluciones conllevan un costo relativo alto, aunque debe analizarse la viabilidad de dichos proyectos para definir si son una opción para la implementación dentro

del país y buscar cómo podría mejorarse la viabilidad al conectar estos sistemas a las redes de distribución.

- Formulación del problema

- Pregunta central

¿Qué condiciones técnicas y económicas requieren las microrredes para poder incrementar el porcentaje de electrificación rural en Guatemala?

- Preguntas auxiliares

- ¿Cuáles son los beneficios a corto o mediano plazo de implementar microrredes en áreas rurales en Guatemala?
 - ¿Cuál es el costo de implementación de una microrred en el área rural?
 - ¿Es viable la incorporación de microrredes como agentes del mercado mayorista guatemalteco?

- Delimitación del problema

Es posible dividir la delimitación del problema desde un punto de vista temporal y espacial, o geográfico. Desde el punto de vista espacial, el problema se estudió para la República de Guatemala, enfocándose en uno de los departamentos que tienen menor porcentaje de electrificación rural; Alta Verapaz.

A pesar de que este es un problema que aún existe en varios países alrededor del mundo, el estudio se centró en Guatemala y la solución y análisis seguramente son extrapolables a poblaciones que tengan características similares. Se pretende que la solución sea aplicable a poblaciones en todos los departamentos del país, pero evidentemente la solución varía dependiendo de las características geográficas, fuentes de energía renovables y de las poblaciones que no tienen electricidad.

Desde el punto de vista temporal el problema de estudio abarca únicamente un período entre finales del año 2021 e inicios del año 2022, es importante mencionar esta delimitación ya que muchas variables relacionadas con poblaciones se mantienen en un cambio continuo, por lo que algunos hallazgos serán válidos únicamente por un par de años, posterior a esto será necesario actualizar la información encontrada.

OBJETIVOS

General

Determinar las condiciones técnicas y económicas de las microrredes que pueden ayudar a incrementar la cobertura de electrificación rural

Específicos

1. Identificar los beneficios a corto/mediano plazo de implementar microrredes en áreas rurales en Guatemala.
2. Evaluar los costos asociados a la implementación de microrredes en áreas rurales en Guatemala.
3. Determinar la viabilidad de Incorporación de una microrred al mercado mayorista guatemalteco.

RESUMEN MARCO METODOLÓGICO

Esta investigación adoptó un diseño no experimental, el enfoque del estudio es mixto. El alcance de esta investigación es transeccional descriptivo. La unidad de análisis es el sistema eléctrico de Guatemala, para el estudio se tomaron regiones representativas del estado de electrificación, como lo es el municipio de San Pedro Carchá, en Alta Verapaz, un departamento de la región centro-norte de Guatemala.

La metodología para el análisis de implementación de microrredes como propuesta para aumentar el porcentaje de electrificación rural lleva una serie de fases para la comparación de costos de implementación de los proyectos de microrredes con los costos de electrificación tradicional, que van desde la construcción de una línea de transmisión pasando por un proceso de transformación y llegando a un sistema de distribución para el suministro a los usuarios.

Las variables consideradas para el estudio son:

- Tipos de recursos aprovechables para generación. El enfoque se centró en la energía solar fotovoltaica.
- Beneficios a corto/mediano plazo: se especifican los beneficios a nivel técnico que implican las microrredes.
- Costos de implementación (GTQ- USD).

- Beneficio económico al incorporar al mercado eléctrico.

La investigación se desarrolló en 5 fases:

- Definición técnica del modelo de microrred como propuesta para el uso en áreas rurales.
- Definición de la población de muestra y búsqueda de datos.
- Cuantificación de costos de la microrred propuesta y definición de la inversión.
- Análisis técnico-económico de la solución.
- Comparación del modelo con otro previendo la conexión a la red de distribución e interacción con el mercado eléctrico.

INTRODUCCIÓN

La electricidad es uno de los motores para el desarrollo social, económico e industrial. Con el uso de la electricidad las personas, comunidades y la sociedad mejoran su productividad y estilo de vida. El desarrollo está directamente relacionado con el acceso a la electricidad ya que brinda herramientas a las personas para ser más eficientes y reducir trabajos repetitivos que no aportan a su crecimiento. La electricidad es necesaria para poder hacer uso de tecnología más avanzada que nos permite realizar trabajos especializados, aunque este es un segundo paso en el camino para el desarrollo.

La línea de investigación que es abarcada en este trabajo es: generación distribuida y redes inteligentes, esta forma parte del área de investigación: modelos de gestión de redes eléctricas. Esta línea de investigación fue seleccionada debido a que la tecnología que se analizará para dar una propuesta técnica al tema de investigación es generación distribuida preferentemente renovable, y las microrredes entran en la subdivisión de redes inteligentes.

La idea de realizar esta investigación comenzó al analizar algunos problemas que están limitando el desarrollo de las personas dentro del país, entre los cuales se puede mencionar; pobreza, desnutrición, analfabetismo. Vemos que son problemas complicados, pero al pensar detenidamente se aprecia que dos de las formas de mejorar el desarrollo de las personas y comunidades son la educación y el trabajo, aunque estos requieren de ciertos elementos para llevarse a cabo, un elemento común es el uso de energía, por ejemplo, para la educación, la energía y algunas herramientas tecnológicas nos dan fácil acceso a la información. En el caso del trabajo se consideró que hay muchas tareas que se

facilitan al poder hacer uso de la energía, en este caso energía eléctrica. También mientras aumenta la complejidad de las tareas el ser humano ha ingeniado formas de facilitar dichas tareas, pero la mayoría de estas formas requieren herramientas que consumen energía. Con lo expuesto se resalta la importancia de poder tener acceso a energía para actividades que se relacionan directamente con el desarrollo, como lo son la educación y el trabajo.

Con lo mencionado previamente vemos que la importancia de este trabajo reside en su impacto social, ya que, aunque el modelo y el estudio se centran en temas técnicos y económicos, si el resultado obtenido es positivo, es decir, si la solución es viable, podrá usarse para impulsar la electrificación de áreas rurales. Es decir, si la solución es viable impulsará el acceso de las personas a la energía eléctrica y así contribuir al desarrollo socioeconómico del país y la región. Además, si económicamente la solución es atractiva, se podría impulsar un modelo de negocio independiente al estado y conseguir el apoyo del sector privado para extender la solución.

Al final del trabajo conoce la viabilidad de la implementación de microrredes con generación distribuida en áreas rurales, la idea de la no viabilidad llevó a considerar si por medio de algún modelo dentro del mercado eléctrico nacional puede volverse viable la implementación de las microrredes. Técnicamente se sabe que es factible la implementación de estos tipos de tecnología y aunque existe un trabajo de ingeniería involucrado, la verdadera incógnita es si económicamente es viable, y cómo debe ser el modelo de negocio a estructurar para la viabilidad.

La investigación consta de 5 capítulos, en la primera sección se aborda un breve marco referencial, con algunas investigaciones previas relacionadas con la investigación, el enfoque principal son las microrredes y algunos modelos

técnicos y económicos de microrredes orientados a áreas rurales. Posteriormente en el capítulo 2 se aborda el marco teórico, en este se considera el estado actual de la electrificación del país, y la información que servirá como base para entender el problema de investigación, así como los modelos con microrredes y generación distribuida que pueden ser una solución al problema.

En el capítulo 3 se tiene el desarrollo de la investigación, la investigación se realizó en 5 fases, que abarcan desde la propuesta de un modelo técnico, pasando por la búsqueda y recolección de datos y finalizando con un análisis técnico y económico de los modelos de solución. Posteriormente se procedió en los capítulos 4 y 5 a la presentación y discusión de resultados respectivamente, con esto finaliza el trabajo de investigación.

1. MARCO REFERENCIAL

Existen muchas investigaciones relacionadas con el uso de microrredes, nanorredes y generación distribuida, hay algunos autores que se enfocan en el diseño y la implementación de arquitecturas, como por ejemplo Nasir *et. al.* (2017) detalla el diseño, análisis e implementación de una arquitectura de microrred de corriente directa solar fotovoltaica fuera de la red altamente distribuida adecuada para la electrificación rural en países en desarrollo. Los autores consideran que la arquitectura propuesta es superior en comparación con las arquitecturas existentes para la electrificación rural debido a su escalabilidad de generación y almacenamiento, mayor eficiencia de distribución (debido a la generación distribuida y almacenamiento distribuido para menores pérdidas de línea), capacidad de proporcionar energía para grandes cargas comunales sin el requisito de una gran generación dedicada extrayendo el beneficio de la diversidad de uso y control localizado usando el método de caída de voltaje basado en histéresis, eliminando así la necesidad de un controlador central. La arquitectura de microrred propuesta consta de varias nanorredes capaces de generar, almacenar y un flujo de energía de forma bidireccional y autónomo dentro de la microrred. El flujo de potencia bidireccional y el control de caída de voltaje distribuido se implementan mediante el control del ciclo de trabajo de un convertidor *flyback* modificado.

En el artículo, así como en otros se realiza un análisis de flujo de potencia, pérdida y eficiencia del sistema mediante el método iterativos para el análisis de redes, otro ejemplo es el que vemos de Nasir, *et. al.* (2020).

Las microrredes solares fotovoltaicas (FV) de corriente directa (CD) han ganado una popularidad significativa durante la última década para la electrificación rural sostenible y de bajo costo. Prácticamente se han implementado varias arquitecturas de sistemas, sin embargo, su evaluación con respecto al tamaño del sistema, las pérdidas y la eficiencia operativa no está disponible en la literatura. En esta investigación se presenta un marco matemático para el análisis comparativo de diversas arquitecturas de microrredes de CC de base solar fotovoltaica para aplicaciones rurales. Cada arquitectura se evalúa en busca de pérdidas, incluidas las pérdidas de distribución y las pérdidas de conversión de la electrónica de potencia, para la entrega de energía típica desde el extremo de la fuente hasta el extremo de la carga en los entornos personalizados de la aldea.

El método Newton-Raphson modificado para el flujo de potencia de CD se utilizó para el análisis de pérdidas de distribución, mientras que el modelado de pérdidas de convertidores electrónicos de potencia junto con la herramienta de ajuste de curvas Matlab se utilizó para la evaluación de pérdidas electrónicas de potencia. Sobre la base del análisis de pérdidas, se presentó un marco para el dimensionamiento de componentes de microrred de CD (fotovoltaica y batería) y también se aplicó a las diversas arquitecturas en consideración. Los resultados del estudio de caso muestran que la generación distribuida y la arquitectura de almacenamiento distribuido con una diversidad de uso típica del 40 % es la arquitectura más factible tanto desde el punto de vista del tamaño del sistema como de los costos operativos y es un 13 % más eficiente desde la generación central y la arquitectura de almacenamiento central para una aldea típica de 40 casas. El marco presentado y los resultados del análisis serán útiles para seleccionar una arquitectura de microrred, y estos estudios respaldan la idea del uso de CD para la implementación de las microrredes enfocadas en electrificación rural.

Otros autores se enfocan en el análisis de pérdidas, este análisis es muy importante para poder optimizar el uso de la energía y reducir los costos de la implementación, dando un enfoque más económico a los análisis, como por ejemplo Khodayar, (2017) presenta las prácticas pasadas y actuales de la electrificación rural y la tendencia actual en el uso de microrredes fuera de la red para proporcionar energía a los clientes que no tienen acceso a la red eléctrica central. Los desafíos corresponden a la expansión de la capacidad de las microrredes fuera de la red, incluyendo los modelos financieros y comerciales para el establecimiento de estas tecnologías, las consideraciones económicas y de confiabilidad, los aspectos ambientales, los estudios de expansión y factibilidad y las incertidumbres en el horizonte de operación.

Con enfoques como el de Gandini, (2017) vemos que la idea fundamental tener un impacto en mejorar la calidad de vida de las personas que aún no tienen acceso a la electricidad: Alrededor del 20 % de la población mundial vive sin acceso a la electricidad, la mayoría de ellos concentrados en áreas rurales subsaharianas. Los enfoques tradicionales para electrificar áreas rurales implican infraestructuras de alto costo y grandes inversiones, mientras que las microrredes de CD, basadas en fuentes renovables y sistemas de almacenamiento, pueden implementarse fácilmente y dar lugar a soluciones rentables. El uso de electrodomésticos eficientes puede reducir drásticamente el consumo de electricidad de los hogares, lo que da lugar a sistemas más pequeños y baratos. El estudio realiza un análisis del uso de aparatos de CD eficientes comenzando por los servicios energéticos esenciales. La optimización del diseño del sistema solar doméstico se puede lograr mediante la evaluación de la variación de la irradiación y los requisitos de carga, encontrando la solución más rentable. La electrificación rural puede tener un impacto importante para mejorar drásticamente la calidad de vida de millones de personas mediante el uso sostenible de la energía solar.

Para poder implementar las microrredes es necesario el uso de una metodología que nos lleve al objetivo deseado, en el estudio realizado por Jiménez *et. al.* (2017) encontramos metodologías para la planificación y diseño de microrredes para el área rural: La electrificación rural trae bienestar económico y social a las comunidades a través de beneficios como suministro de energía para centros médicos, acceso a tecnología, mejora de las tareas del hogar y calidad del agua, entre otros. Sin embargo, debido a la baja densidad de población y la baja demanda de electricidad, el costo de extender una red existente a una comunidad aislada puede ser muy alto, en comparación con un esquema de electrificación de microrredes. El estudio presenta una metodología para planificar y diseñar una microrred para la electrificación rural de ubicaciones remotas fuera de la red. Esta metodología prioriza las mejoras en la calidad de vida de sus habitantes teniendo en cuenta diferentes variables como: ubicación, disponibilidad de recursos energéticos renovables, precios de equipos, presupuesto inicial, costos de operación y mantenimiento y costos de reemplazo de equipos.

Para conocer la viabilidad de los proyectos de electrificación rural es importante conocer las causas del éxito y el fracaso de los sistemas eléctricos solares independientes en las zonas rurales, como expone Corsair, (2013) pueden ser técnicas, institucionales, culturales o económicas. Examina estas causas utilizando un enfoque de métodos mixtos que incluye entrevistas con miembros de comunidades rurales pobres a las que se han donado sistemas eléctricos solares independientes, inspecciones físicas de estos sistemas y conversaciones con profesionales del desarrollo que trabajan en electrificación rural. El éxito es un concepto complejo, definido como una combinación de la percepción del éxito del usuario, la utilidad para los usuarios y la optimización como fuente de energía. La economía es un fuerte impulsor del éxito del sistema: los sistemas generalmente ofrecen a los usuarios ahorros de costos, pero pocas

oportunidades de generación de ingresos; el acceso al capital cuando los componentes necesitan ser reemplazados es un obstáculo importante; y los beneficiarios relativamente más ricos están en mejores condiciones de mantener los sistemas donados que sus vecinos más pobres. Las instituciones y relaciones que rodean a los sistemas también influyen en el éxito y el fracaso: las instituciones locales como los comités de energía pueden ayudar a que los sistemas sean más exitosos, mientras que las instituciones nacionales y regionales como el débil sistema de justicia de Guatemala y las extensas redes del crimen organizado contribuyen al fracaso.

El sentido de propiedad de los beneficiarios y las contribuciones monetarias a los proyectos por parte de los beneficiarios no contribuyen al éxito del sistema, mientras que la rendición de cuentas a los donantes y la participación continua de los donantes sí lo son. La calidad del diseño y los componentes instalados del sistema físico pueden tener poca relación con el éxito del sistema. Los donantes deben tener claras sus definiciones de éxito y las de los beneficiarios, y deben estar dispuestos a desafiar la sabiduría recibida sobre lo que conducirá a proyectos más y menos exitosos. Definir el éxito como una alta tasa de sistemas operativos tenderá a favorecer a los beneficiarios relativamente más ricos, lo que generará dudas sobre la justicia social y si las intervenciones energéticas son las más apropiadas para quienes viven en la pobreza extrema. Además, los sistemas de energía físicamente interconectados, como las microrredes, pueden generar conexiones sociales e institucionales más fuertes que los sistemas físicamente independientes incluidos en esta investigación.

El impacto que tiene la electrificación en la población con un enfoque en las mujeres es analizado por Duvall, (2019), donde nos expone los beneficios de la electrificación, se discuten ampliamente en la literatura sobre energía y desarrollo, pero hasta la fecha poca investigación ha estudiado los impactos del

acceso a la electricidad en el hogar en las mujeres en particular. Las mujeres constituyen la mayoría de los pobres del mundo y también se ven afectadas de manera desproporcionada por la pobreza energética debido a su condición social y funciones domésticas, pero comprender la pobreza de las mujeres es difícil. Si bien se dispone de pocas mediciones de la pobreza individual, las encuestas sobre el uso del tiempo a nivel de país brindan una idea del uso productivo del tiempo al medir las horas dedicadas al trabajo remunerado y no remunerado.

Duvall, (2019) Utiliza encuestas de uso del tiempo de Guatemala y El Salvador para examinar cómo el tiempo que las mujeres rurales dedican al trabajo remunerado, el trabajo doméstico no remunerado y el tiempo libre se ve afectado por el acceso a la electricidad. En el estudio se examinan las políticas actuales y la situación de las mujeres en estos dos países y emplea modelos de regresión lineal cuantitativa utilizando encuestas gubernamentales sobre el uso del tiempo y el hogar. Los resultados muestran que el acceso a la electricidad aumenta significativamente el tiempo libre diario en ambos países, pero solo en Guatemala es el acceso a la electricidad un indicador significativo de aumento del trabajo remunerado y disminución del trabajo doméstico no remunerado. La aplicación del enfoque de capacidades al tema ofrece una comprensión de la electricidad como parte de una solución multidimensional a la desigualdad de género. Por lo tanto, los hallazgos sugieren que la electricidad puede potencialmente aliviar la pobreza de las mujeres, pero que el apoyo social, como la capacitación laboral, también puede ser importante para aumentar el uso productivo del tiempo.

La provisión de energía el uso de recursos locales y renovables se reconoce cada vez más como una solución tecno-económica para la electrificación rural. Ubilla *et. al.* (2014) describen un enfoque para implementar proyectos de microrredes a nivel institucional por medio de una entidad específica

que utiliza métodos que involucran a la comunidad en la operación y mantenimiento de microrredes (OyM), lo que asegura beneficios a largo plazo. El primer paso, relacionado con las barreras a nivel macro, se aborda mediante la construcción de un catastro completo de comunidades aisladas, mientras que el segundo, a nivel micro, se enfoca en modelos comerciales para cubrir los costos de inversión y OyM. Un catastro descubre las características clave de cada lugar (recursos energéticos, disponibilidad, condiciones socioeconómicas, medio ambiente, entre otros).

Un catastro también ayuda a identificar las necesidades locales, desarrollar estrategias de monitoreo y determinar puntos de referencia entre las microrredes. Su información también ayuda a proponer nuevos proyectos, asegurar financiamiento y monitorear las microrredes reales. A nivel microeconómico, se identifican las partes interesadas locales, las capacidades económicas, el capital social y las estructuras organizativas, que contribuyen a la selección de un modelo de negocio personalizado que pueda permitir la recaudación de fondos y las actividades de OyM. El enfoque se presenta en un marco de cuatro etapas: recopilación de datos de antecedentes; construcción del perfil de la comunidad; diseño del sistema; y ingeniería de detalle. Cada comunidad es evaluada por un índice de priorización que considera las condiciones eléctricas de cada residencia.

El acceso a la electricidad es un factor importante para el desarrollo económico y social. Williams *et. al.* (2015) exponen que las bajas tasas de acceso, particularmente en el área rural remotas en regiones como el África subsahariana, el sur de Asia y el sudeste asiático, han llevado a las naciones en desarrollo y las organizaciones internacionales a establecer metas ambiciosas para expandir el alcance de la electricidad. Se han propuesto soluciones

descentralizadas como las microrredes como soluciones rentables para llegar a las comunidades ubicadas lejos de la infraestructura de la red central.

La falta de capital de fuentes públicas y de donantes ha impedido gravemente el logro de las metas de acceso, lo que ha llevado a reclamar una mayor participación del sector privado en las actividades de electrificación. Sin embargo, debido al alto nivel de riesgo asociado con los proyectos de electrificación descentralizados en áreas de bajos ingresos, los rendimientos marginales esperados de la inversión y la falta de una política pública clara y efectiva, el sector privado no ha mostrado un interés significativo en participar en tales proyectos.

Williams, Jaramillo, Taneja, y Ustun, (2015) revisan las barreras a la participación del sector privado en proyectos de electrificación descentralizada e identifican las soluciones que se han implementado y propuesto para superar estas barreras. Las barreras discutidas incluyen flujos de ingresos inseguros, incapacidad para financiar proyectos y riesgos de proyectos a largo plazo, como la invasión de la red. La gama de intervenciones y modelos comerciales revisados incluye métodos para asegurar una demanda confiable, modelos de subsidios, garantías de riesgo y diferentes modelos de ingresos.

Considerando estos antecedentes documentales se observa que las microrredes que contemplan generación distribuida tienen mucho potencial para mejorar el porcentaje de electrificación rural en Guatemala, aunque aún se debe analizar si alguno de los modelos existentes de microrredes de corriente directa funcionará también en Guatemala, pero lo que es evidente es el impacto positivo que tiene la electrificación rural en el desarrollo de las personas y comunidades.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Electrificación rural en Guatemala

El estado de la electrificación en Guatemala según la política de electrificación rural indica que se ha alcanzado un índice de cobertura de la red eléctrica del 88.14 % y el acceso a la energía es actualmente de 91.23 %.

2.1.1. Estado de la electrificación rural en Guatemala

Actualmente en Guatemala hay alrededor de 1.78 millones de hogares de guatemaltecos que cubren sus necesidades energéticas con recursos no sostenibles, como leña.

En la Política de Electrificación Rural se habla sobre el plan nacional de desarrollo Katún 2032 del Gobierno de Guatemala, en el apartado se expone que la energía es un factor fundamental para el desarrollo social y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población. Favorece la superación de la pobreza y el incremento de los ingresos familiares, apoya el desarrollo de actividades sociales, productivas, comerciales y agrícolas. Asimismo, contribuye a elevar la calidad de la habitabilidad, pues permite el acceso a la energía eléctrica domiciliar y la prestación de diversos servicios básicos, entre ellos el acceso al agua para el consumo humano. Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia (Ministerio de Energía y Minas, 2014).

En la actualidad el instituto nacional de electrificación INDE es el encargado de impulsar la electrificación en el país, es posible encontrar en el

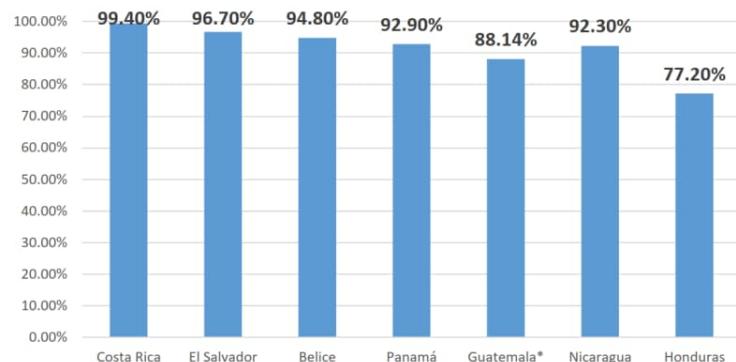
artículo 24 de la Ley orgánica del INDE que: el INDE debe invertir de forma prioritaria en proyectos del área rural cuando tenga superávit financiero, de acuerdo con los planes de desarrollo establecidos por el MEM (INDE, 2010). Vemos que en este artículo aunque está orientado a la electrificación del país, la realidad es que el INDE desde hace años no tiene este superávit financiero, ya que el gobierno de Guatemala ante cualquier contingencia o necesidad por parte del pueblo de Guatemala se apoya del INDE para solventarlo sin hacer una adecuada planificación del retorno de los bienes tomados del INDE, esto nos lleva a que en realidad el INDE no tiene estos montos para poder continuar con la electrificación del país, la única forma de realizarlo es por medio de otra entidad que sea totalmente ajena al estado de Guatemala.

Adicional a esto Guatemala adoptó los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en la reunión de alto nivel de la ONU celebrada en septiembre de 2015, dentro de estos objetivos Guatemala adquirió la siguiente meta:

Para el año 2030, garantizar el acceso universal a servicios de energía asequibles, confiables y modernos. Lastimosamente es mi apreciación personal que no hay un plan concreto para alcanzar estos objetivos tan ambiciosos, y a pesar de que existen algunas políticas orientadas en esta dirección no se observa mucho de forma concreta (Ministerio de Energía y Minas, 2020).

Podemos tomar de referencia el estado de la electrificación a nivel regional, según datos oficiales se puede observar el porcentaje de electrificación de los países centroamericanos:

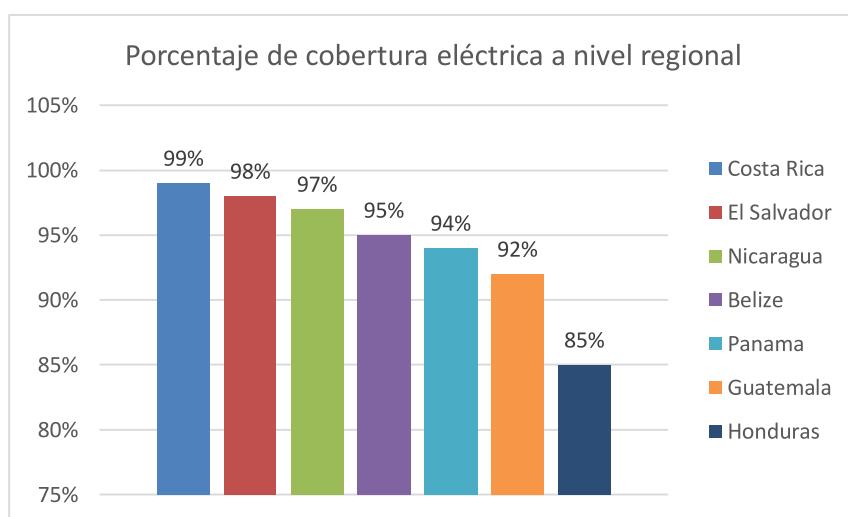
Figura 1. Porcentaje de cobertura eléctrica a nivel regional año 2016



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2020). *Política de electrificación rural 2020-2050*.

De fuentes no oficiales, se encontró que para el año 2020 el porcentaje de electrificación rural se muestra de acuerdo con la figura 2.

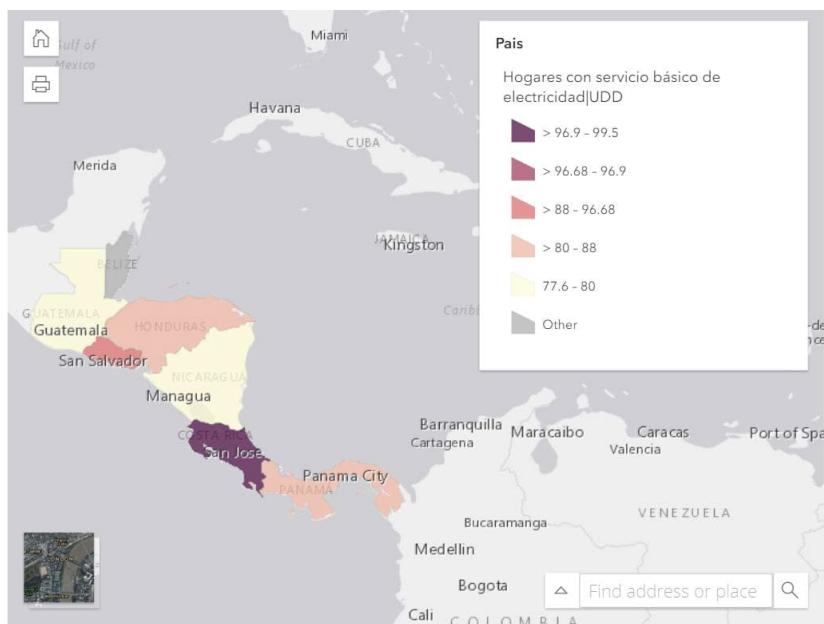
Figura 2. Porcentaje de cobertura eléctrica a nivel regional año 2020



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

También podemos observar los porcentajes de hogares que tienen acceso al servicio de energía eléctrica para centro américa en las siguientes imágenes:

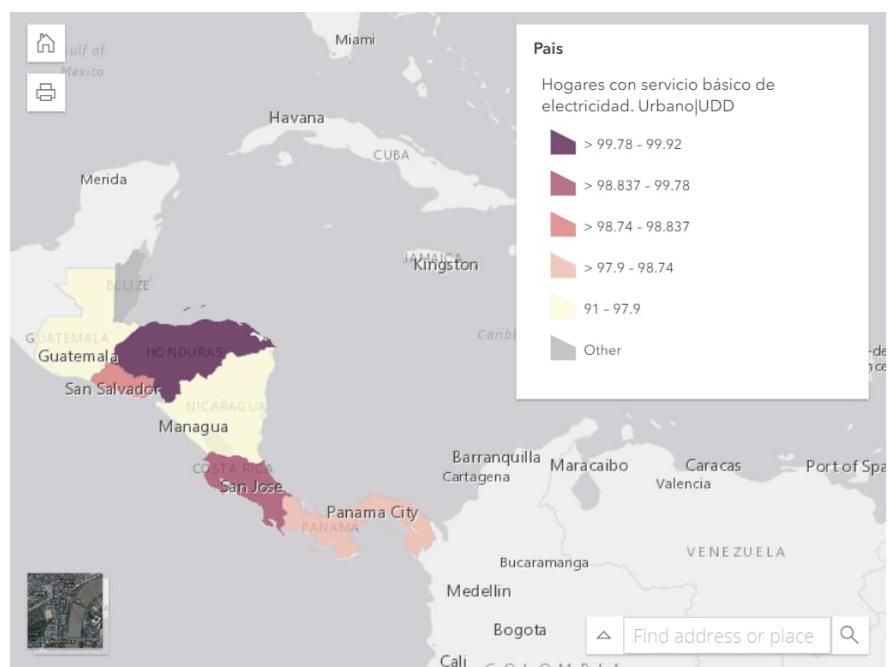
Figura 3. Hogares con servicio básico de electricidad



* UDD, ultimo dato disponible: Costa Rica - 2017, El Salvador - 2017, Guatemala - 2014, Honduras - 2017, Nicaragua - 2009, Panamá - 2010, Rep. Dominicana - 2015

Fuente: Sistema de Información Centroamericano (2021). *Servicios de electricidad*.

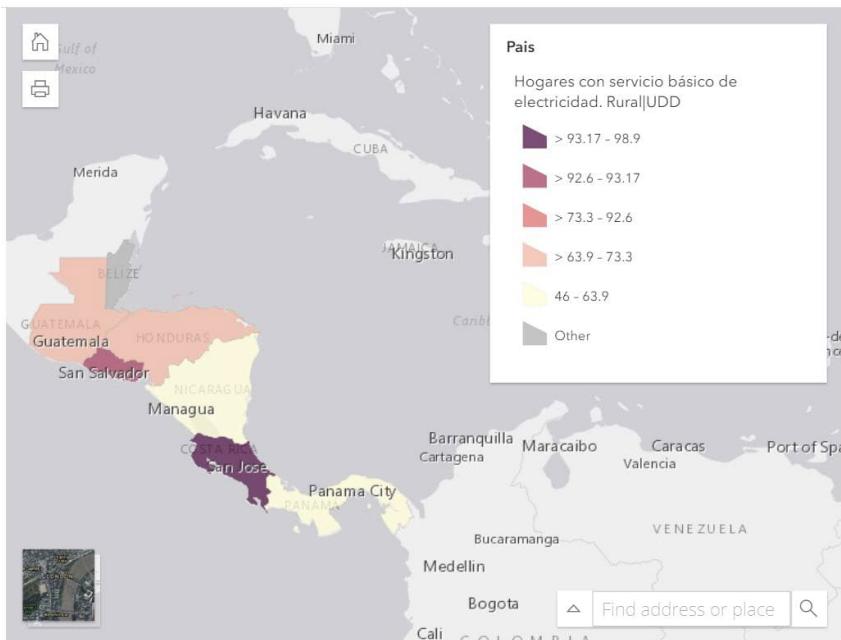
Figura 4. Hogares con servicio básico de electricidad (urbano)



* UDD, ultimo dato disponible: Costa Rica - 2017, El Salvador - 2017, Guatemala - 2014, Honduras - 2017, Nicaragua - 2009, Panamá - 2010, Rep. Dominicana - 2015

Fuente: Sistema de Información Centroamericano (2021). *Servicios de electricidad*.

Figura 5. Hogares con servicio básico de electricidad (rural)

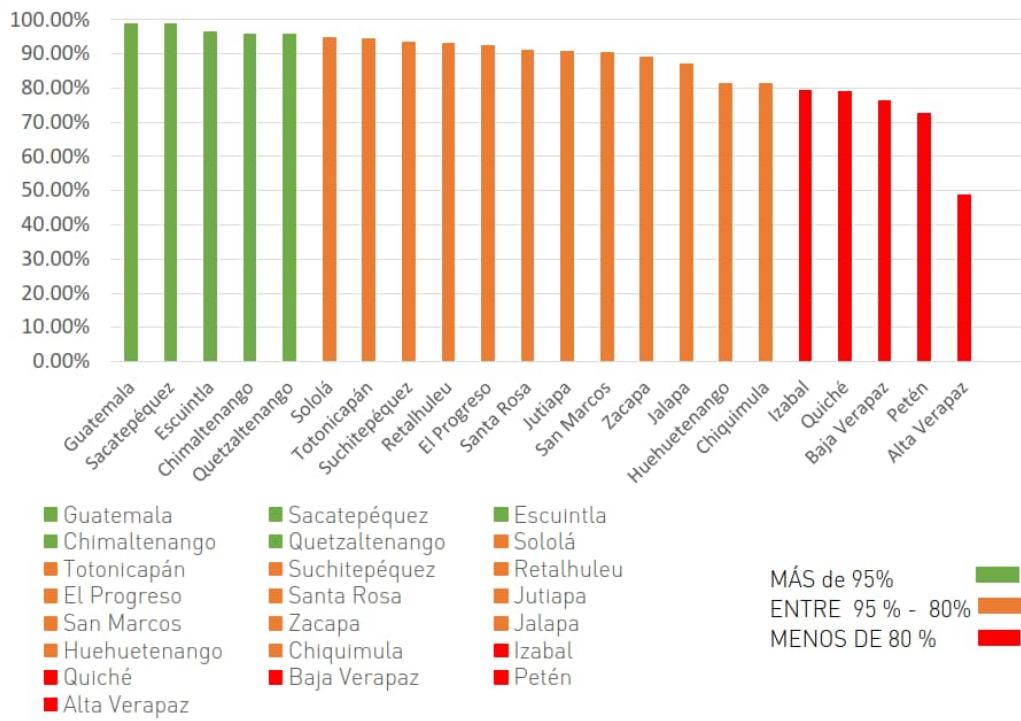


* UDD, ultimo dato disponible: Costa Rica - 2017, El Salvador - 2017, Guatemala - 2014, Honduras - 2017, Nicaragua - 2009, Panamá - 2010, Rep. Dominicana - 2015

Fuente: Sistema de Información Centroamericano (2021). *Servicios de electricidad*.

Vemos que en el 2017 según la última información obtenida del SICA el porcentaje de hogares con acceso a la energía para Guatemala eran de 80 %, aunque es notoria una diferencia entre el área rural y el área urbana, ya que de acuerdo con los datos encontrados los porcentajes de hogares con acceso a electricidad eran de 91 % para el área urbana y 69 % para el área rural. De acuerdo con las figuras anteriores. Ahora teniendo en cuenta información más detallada, de la Política de Electrificación Rural 2020-2050 del Gobierno de Guatemala, se tiene la distribución del porcentaje de electrificación por departamento:

Figura 6. Porcentaje de electrificación por departamento



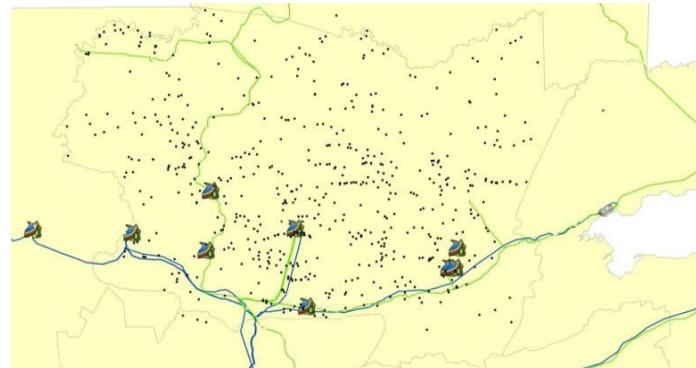
Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2020). *Política de Electrificación Rural 2020-2050*.

Podemos observar que existen 5 departamentos con un porcentaje de electrificación menor al 80 %, lo cual está bastante alejado de los objetivos que busca el país. Se toman de referencia los 5 departamentos con menor porcentaje de electrificación en las siguientes imágenes:

Figura 7. Estado de la electrificación en el departamento de Alta Verapaz

Tabla 1: Cobertura eléctrica municipios de Alta Verapaz.

ALTA VERAPAZ		
No.	Municipio	Cobertura eléctrica
1	Tactic	82.04%
2	Santa Cruz Verapaz	81.91%
3	San Cristóbal Verapaz	75.71%
4	Chisec	59.34%
5	Santa Catalina La Tinta	59.06%
6	Tamahú	58.24%
7	Cobán	57.74%
8	Raxruhá	55.72%
9	San Juan Chamelco	53.33%
10	San Miguel Tucurú	49.27%
11	Fray Bartolomé de Las Casas	44.80%
12	Panzós	40.19%
13	San Pedro Carchá	38.90%
14	Chahal	30.54%
15	Santa María Cahabón	24.04%
16	San Agustín Lanquín	23.04%
17	Senahú	22.86%



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2020). *Política de Electrificación Rural 2020-2050.*

Figura 8. Estado de la electrificación en el departamento de Baja Verapaz

Tabla 2: Cobertura eléctrica municipios de Baja Verapaz.

BAJA VERAPAZ		
No.	Municipio	Cobertura eléctrica
1	Santa Cruz El Chol	90.25%
2	Salamá	89.94%
3	San Jerónimo	88.19%
4	Rabinal	86.25%
5	Granados	85.65%
6	San Miguel Chicaj	83.77%
7	Cubulco	67.90%
8	Purulhá	38.52%

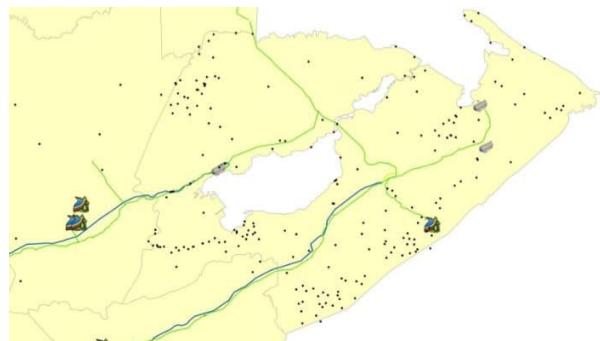


Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2020). *Política de Electrificación Rural 2020-2050.*

Figura 9. Estado de la electrificación en el departamento de Izabal

Tabla 9: Cobertura eléctrica municipios de Izabal.

IZABAL		
No.	Municipio	Cobertura eléctrica
1	Puerto Barrios	95.98%
2	Morales	85.96%
3	Los Amates	83.93%
4	Livingston	63.93%
5	El Estor	49.73%

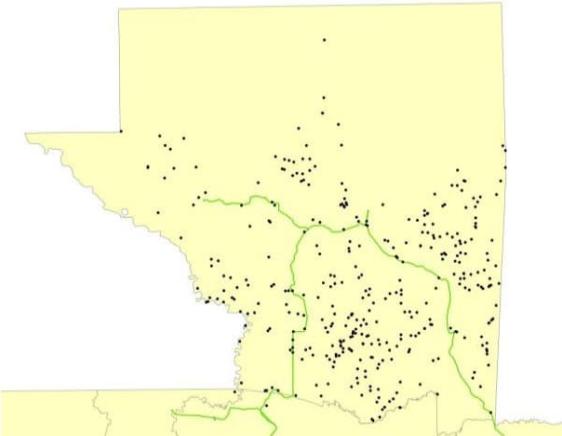


Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2020). *Política de Electrificación Rural 2020-2050.*

Figura 10. Estado de la electrificación en el departamento de Petén

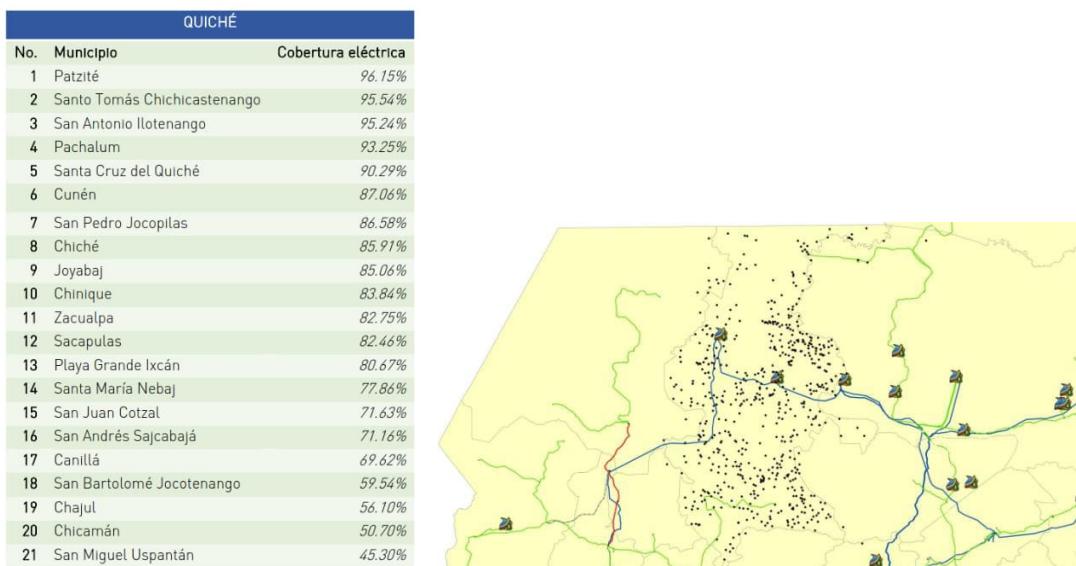
Tabla 12: Cobertura eléctrica municipios de Petén.

PETÉN		
No.	Municipio	Cobertura eléctrica
1	San Benito	90.80%
2	Flores	89.06%
3	La Libertad	80.00%
4	Melchor de Mencos	76.67%
5	Las Cruces	75.78%
6	Santa Ana	74.04%
7	San José	73.45%
8	San Francisco	73.21%
9	Sayaxché	68.54%
10	Poptún	67.40%
11	San Luis	64.67%
12	El Chal	62.96%
13	Dolores	61.67%
14	San Andrés	44.99%



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2020). *Política de Electrificación Rural 2020-2050.*

Figura 11. Estado de la electrificación en el departamento de Quiché



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2020). *Política de Electrificación Rural 2020-2050*.

Se observa que hay departamentos con porcentajes de electrificación muy bajos, menores a 50 %. También se aprecia que las poblaciones se encuentran dispersas geográficamente, y una buena parte se encuentra alejada de las redes de distribución.

2.1.2. Desafío de la electrificación rural en Guatemala

Como se comentó en la sección anterior la electrificación rural es un problema bastante serio para Guatemala, lograr aumentar el porcentaje de electrificación trae una variedad de beneficios a las poblaciones y a la sociedad reduce la desigualdad, incrementa el cuidado de la salud, la atención a la educación , tiene el potencial de incrementar la productividad reduciendo algunos trabajos domésticos y tareas, con lo que se aumenta el tiempo libre para otras

actividades, como educación, emprendimiento, lo cual lleva a una mejora económica (Duvall, 2019).

En 2015 las Naciones Unidas delinearon 7 metas para el desarrollo sostenible, de las cuales la número 7 relacionada con el acceso a la energía eléctrica es un catalizador para el éxito de las demás metas, de forma indirecta el acceso a la energía eléctrica es una meta clave para el desarrollo.

Teniendo en cuenta el estado de la electrificación en Guatemala, vemos que es un desafío bastante grande el poder mejorar el porcentaje de electrificación, ya que actualmente se tiene un porcentaje de electrificación de 91.23 %, esto si consideramos que la población actual de Guatemala es de aproximadamente 17 Millones de habitantes, significa que 1.49 millones de personas no tienen acceso a la energía eléctrica. Por lo cual vemos que al mejorar el problema de la electrificación podemos ayudar a más de 1 millón de personas y darles opciones para el desarrollo.

Un detalle importante resaltado por Duvall, (2019) es que la pobreza se acentúa según el género de las personas, por temas culturales las mujeres se ven más afectadas al encontrarse en condiciones de pobreza, por lo cual brindar electricidad a las poblaciones rurales ayudará a mejorar las condiciones de pobreza de estas, y se comenzaría a reducir la desigualdad de género, que se ve acentuada por la falta de electricidad y por las condiciones de pobreza de las personas.

Para lograr la meta de la electrificación en Guatemala encontramos otro desafío importante, en la descripción brindada en el plan indicativo de electrificación vemos que los lugares con menor electrificación tienen ciertas

características geográficas o demográficas en común, entre estas características podemos mencionar:

- Terrenos irregulares
- Zonas con una flora abundante
- Lejanía de poblaciones grandes
- Lejanía de la red de transmisión/distribución actual

De estas características también podemos observar en los mapas mostrados en las de la figura 7 a la figura 11, que son poblados lejanos a la red de transmisión o distribución existente, lo que nos lleva a pensar que una de las dificultades más grandes para proveer de electrificación a estas comunidades es la construcción de una línea que llegue hasta donde se encuentran estas poblaciones.

Ahora teniendo en consideración la distribución geográfica de las poblaciones y la ubicación de las redes actuales de distribución vemos que la expansión del sistema actual se ve limitado por temas constructivos, geográficos, ambientales y sociales. De aquí se desprende la idea que la mejor opción en este momento sea el uso de generación distribuida, que podría estar más cercana a los puntos de consumo, creando la necesidad de microrredes con generación distribuida. En este punto es una apreciación aún muy superficial, pero dentro de los objetivos de este estudio está determinar la realidad de este argumento, y cuantificar la diferencia económica de la instalación de una microrred con generación distribuida y la expansión de la red de distribución actual. Para este análisis se tomarán en cuenta proyectos desarrollados y planificados por el INDE según el plan indicativo de electrificación rural. Ministerio de Energía y Minas.

2.2. Generación distribuida

Se llama generación distribuida a todo aquel tipo de generación que se encuentra cercana a los puntos de consumo, pudiéndose o no conectar a las redes de distribución y su aporte de potencia no es muy grande, para el caso de Guatemala existe normativa que define el límite de potencia en 5MW.

También podemos mencionar algunas definiciones que nos ayudarán a ampliar nuestro concepto:

Según Gobierno de México y Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (2021):

- Generación en pequeña escala instalada cerca del lugar de consumo.
- Producción de electricidad con instalaciones que son suficientemente pequeñas en relación con las grandes centrales de generación, de forma que se puedan conectar casi en cualquier punto de un sistema eléctrico.
- Es la generación conectada directamente en las redes de distribución.
- Es la generación de energía eléctrica mediante instalaciones mucho más pequeñas que las centrales convencionales y situadas en las proximidades de las cargas.
- Es la producción de electricidad a través de instalaciones de potencia reducida, comúnmente por debajo de 1,000 kW.
- Son sistemas de generación eléctrica o de almacenamiento, que están situados dentro o cerca de los centros de carga.

- Es la producción de electricidad por generadores colocados, o bien en el sistema eléctrico de la empresa, en el sitio del cliente, o en lugares aislados fuera del alcance de la red de distribución.
- Es la generación de energía eléctrica a pequeña escala cercana a la carga, mediante el empleo de tecnologías eficientes, destacando la cogeneración, con la cual se maximiza el uso de los combustibles utilizados. (párr. 7)

De acuerdo con la norma técnica de Generación distribuida renovable la modalidad de generación de electricidad, producida por unidades de tecnologías de generación con recursos renovables, que se conectan a instalaciones de distribución cuyo aporte de potencia neto es inferior o igual a cinco megavatios (5 MW).

Se observa que la normativa nacional contempla la conexión de esta generación a la red de distribución, lo cual limita por lo menos desde un punto de vista normativo a la generación que se encuentra aislada y que no está conectada a la red de distribución.

La generación distribuida puede brindar grandes beneficios a la red de distribución e indirectamente también puede beneficiar la red de transmisión, por ejemplo ayudaría a mantener la regulación de voltaje en el área cercana, puede mantener la alimentación de una zona en particular si el segmento de red es lo suficientemente inteligente como para aislarse en caso de una falla cercana, reduce la cantidad de generación que se requiere de la red de transmisión, por lo que se reducen las pérdidas en el sistema.

Se deben tomar en cuenta algunos detalles técnicos para la instalación de generación distribuida:

- El sistema de control y protección para la generación.
- El diseño de los conductores y cables para la conexión directa del generador y los que estarán instalados en áreas cercanas al sistema.
- Equipos de conversión para el caso de sistemas de generación en corriente directa CD.

Para sistemas de generación en corriente directa que sean conectados a la red de distribución también es necesario algún sistema de filtrado o que los equipos cumplan con normativa enfocada en evitar distorsiones en el suministro para la red de distribución.

2.2.1. Generación mediante paneles solares

La generación de energía por medio de radiación solar puede realizarse principalmente por medio de dos métodos:

- Generación por medio del fenómeno fotoeléctrico.
- Generación por medio de calor y conversión a otro tipo de energía; esta es una transformación indirecta, ya que la energía se transforma en otro tipo de energía antes de poder ser usada en forma eléctrica.

Para la transformación de la radiación solar en energía eléctrica se desarrollaron los paneles solares, estos se construyen generalmente con un material semiconductor (silicio) y este se distribuye en una superficie plana (panel).

De acuerdo con Matsumoto (2010) Algunos beneficios de los paneles solares son:

- Materia prima abundante; donde la radiación solar tiene una baja densidad energética, se requiere material para uso práctico y de suficiente área.
- Se puede tomar como una tecnología madura, ya que se asemeja en la fabricación con los procesos de la microelectrónica o de los circuitos integrados.
- En comparación con el silicio multicristalino o el amorfo hidrogenado, puede desarrollar una mayor eficiencia en convertir la luz a electricidad.
- Los módulos son garantizados por sus fabricantes por más de 20 años de funcionamiento, siendo un dispositivo con propiedades eléctricas estables.

Actualmente se han desarrollado tres tipos de paneles solares según la estructura de los cristales de silicio:

- Paneles monocristalinos
 - Una sola pieza de cristal
 - Barras largas y cilíndricas
 - El más alto nivel de eficiencia
 - Color azul oscuro
 - Costosas

Estas celdas son fabricadas con silicio de alta pureza y calidad, esto les brinda alta eficiencia en niveles de baja luminosidad Matsumoto, (2010).

- Paneles policristalinos
 - Compuesta por múltiples cristales de gran pureza
 - Cuadradas
 - Alto nivel de eficiencia
 - Color azul intenso
 - Más baratas que las monocrystalinas
- Paneles amorfos
 - Compuesta por una película delgada de silicio sobre una hoja de acero
 - Bajo nivel de eficiencia
 - Utilizadas en pequeños paneles solares, como calculadoras o relojes
 - Bajo costo

2.2.2. Almacenamiento de energía en baterías

Para que un sistema de generación solar pueda brindar energía a una carga durante todo el día es necesario hacer uso de sistemas de almacenamiento de energía, ya que la generación de energía por medio de radiación solar únicamente se puede realizar la mitad del día, por lo que la otra mitad es necesario hacer uso de otro método de generación, o diseñar el sistema de modo que los excedentes durante el día sean almacenados y puedan ser usados en los períodos sin radiación solar.

Es aquí donde entran en juego los sistemas de almacenamiento de energía, para el presente estudio el enfoque se da hacia los sistemas de

almacenamiento por medio de baterías. Actualmente las baterías más usadas para el almacenamiento de energía son de acuerdo con Santillán, (2016):

- Plomo-ácido (Pb)
- Alcalinas: de Níquel- Cadmio (NiCd), Níquel-Zinc (alcalinas), níquel-hidruros metálicos (Ni-MH).
- Sodio alta temperatura: sodio-azufre (NaS), sodio-cloruro de níquel (Na-NiCl₂ Zebra).
- Litio: ion litio, litio-polímero.
- Flujo redox: vanadio (VFR), zinc-bromo (Zn-Br).

“Para la selección de las baterías se deben tener en cuenta las características operativas que mejor se adecúen al sistema en desarrollo” (Santillán, 2016, p. 8).

“Rendimiento es la relación entre la energía que se extrae de la batería y la energía que ingresa en la misma. Se debe a las pérdidas en la batería durante la carga y descarga, especialmente por efectos caloríficos” (Santillán, 2016, p. 8).

Profundidad de descarga es el valor en porcentaje de la energía que se puede sacar de un acumulador plenamente cargado en una descarga. Por ejemplo, si tenemos una batería de 100Ah y la sometemos a una descarga de 20Ah, esto representa una profundidad de descarga del 20 %. (Santillán, 2016, p. 8)

“Ciclos de carga/descarga es la cantidad de veces que se puede cargar y descargar una batería en su vida útil. Si la descarga es profunda el número de ciclos se reduce, por tanto, su vida útil disminuye” (Santillán, 2016, p. 8).

Para la presente aplicación, la batería debe ser capaz de sostener corrientes moderadas, durante varias horas. Además, debe permanecer activa sin recibir carga alguna (horario nocturno). Debe ser capaz de trabajar sin períodos de reposo, ya que está siendo cargada o descargada a lo largo del día; y también, debe ser de ciclo profundo. (Santillán, 2016, p. 8)

2.2.3. Sistema de gestión de baterías

Como parte del sistema de almacenamiento se considerará un dispositivo para la gestión de las baterías, ya que esto permitirá una operación más adecuada de las mismas y evitar forzarlas en umbrales o puntos de operación inadecuados.

La idea es que el sistema de gestión opere en el ciclo de carga y descarga por lo menos una vez al día, ya que se debería tener por lo menos un ciclo de carga y descarga diario

2.2.4. Inversores de forma de onda

Son dispositivos electrónicos encargados de convertir una forma de onda de corriente directa CD en corriente alterna CA, estos elementos serán incorporados, ya que la mayoría de dispositivos que se existen en el mercado son alimentados con corriente alterna, es más fácil convertir todo el sistema a Corriente alterna, y hacer uso posterior de las fuentes de alimentación de cada dispositivo, lastimosamente no es el método más eficiente, pero es lo más práctico, ya que de lo contrario se tendría que rediseñar todo el sistema para tener tres o más fuentes de alimentación en DC.

Los inversores deben entregar una forma de onda Senoidal a la salida, aunque se sabe que, dependiendo la tecnología usada, estos pueden incorporar ruido al sistema DC, este ruido también conocido como corrientes armónicas es causado por el sistema de inversión. De acuerdo con Rosas (2014):

La calidad de un inversor se suele evaluar en términos de los siguientes parámetros:

- Los armónicos son frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental de trabajo y cuya amplitud va decreciendo conforme aumenta el múltiplo.
- Distorsión armónica total (THD). Es una medida de la coincidencia de formas entre una onda y su componente fundamental.
- Factor de distorsión (FD). Indica la cantidad de distorsión armónica que queda en determinada forma de onda después de someter a las armónicas de esa onda a una atenuación de segundo orden, es decir, dividirlas entre n^*n . Así el factor de distorsión es una medida de la eficacia de reducción de armónicas no deseadas, sin tener que especificar los valores de un filtro de carga de segundo orden.
- Armónico de orden más bajo (LOH). Es aquel componente armónico cuya frecuencia se acerca más a la fundamental y su amplitud es mayor o igual al 3 % de la componente fundamental.
- Factor de potencia. Está definido como el cociente de la potencia promedio y la potencia aparente. (pp. 12-13)

Normalmente la vida útil de los inversores es menor a la de los paneles solares, por lo que para el estudio económico será necesario tomar en cuenta uno o dos cambios en inversores, mientras se completa un ciclo de vida para los paneles solares.

2.3. Microrredes

Las microrredes son pequeñas redes conformadas por algunos generadores interconectados que alimentan cargas que generalmente se encuentran aisladas o lejanas a redes de distribución, otros elementos que pueden formar parte de las microrredes son los dispositivos de almacenamiento y los dispositivos de control y protección. Generalmente las microrredes operan como un solo elemento, y este puede o no estar conectado a la red de distribución. La generación dentro de las microrredes puede ser pequeña, desde algunos kilovatios, o grande, hasta varios megavatios.

Las microrredes tienen la posibilidad de brindar acceso a la energía a poblaciones con escasos recursos y en áreas rurales que en otro caso no sería posible debido al tiempo o costo. Khodayar (2017) menciona que las microrredes desde el punto de vista tecnológico proveen la solución más económica para la electrificación en áreas remotas. De hecho, las microrredes pueden volverse una alternativa para la extensión de redes, principalmente si la tendencia de reducción de costos persiste.

De acuerdo con Khodayar, (2017) la aplicación de las microrredes en Estados Unidos se puede dividir en cuatro categorías según su aplicación:

- Islas y sistemas remotos

- Uso comercial e industrial; para proveer mejor calidad y confiabilidad, o suministrar energía más limpia y barata.
- Comunidades, instituciones y universidades para proveer electricidad a hospitales, gobierno o edificios
- Uso militar.

Para el caso de Guatemala el uso de las microrredes puede aplicar de la misma forma, aunque con pequeñas modificaciones, es posible que donde se tuviera un mayor beneficio de la implementación de microrredes es para los sistemas remotos y la electrificación rural.

Las microrredes comienzan a tomar un papel muy importante en temas de electrificación, principalmente en países emergentes como el caso de Guatemala, se observa que, al tener comunidades geográficamente dispersas en extensiones de territorio grandes, como se comentó en el capítulo 1; la opción de extender las líneas de distribución no parece viable, sus costos se incrementan mucho y las comunidades a las que favoreces son muy pocas. Para poder sacar el mayor potencial a las microrredes y poder aprovechar sus virtudes se hace necesario hacer un uso óptimo de la solución técnica ya que para la implementación en lugares con escasos recursos se hace necesario el valor mínimo y una solución óptima.

Se puede observar que en el estudio realizado por Nasir *et. al.* (2017) se explica cómo un modelo de generación distribuido y redes en DC pueden tener ventajas para la electrificación rural en comparación con microrredes que prevén trabajar con AC.

De acuerdo con Nasir *et. al.* (2017) vemos que un sistema de generación fotovoltaico en una microrred en corriente directa cd tiene las siguientes ventajas comparada con una microrred convencional:

- Escalabilidad de generación y almacenamiento.
- Mayor eficiencia de distribución (debido a la generación y almacenamiento distribuidos para menores pérdidas en la línea).
- Capacidad para proporcionar potencia para cargas comunales más grandes sin el requisito de generación grande y dedicada.
- Control localizado mediante el uso del método de caída de voltaje e histéresis, eliminando así la necesidad de un controlador central.

También Nasir *et. al.* (2017) menciona que generación distribuida en CD tiene una eficiencia final de aproximadamente el 80 % (para cargas en corriente directa), en comparación con una eficiencia del 60 % con las microrredes de CA.

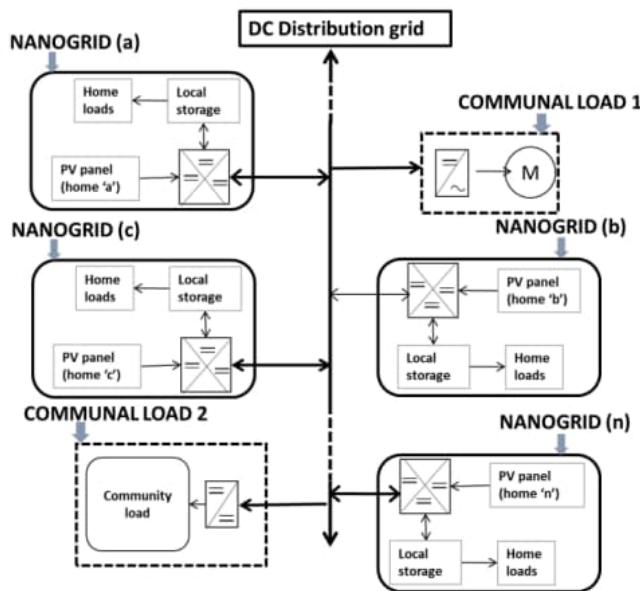
Los sistemas de microrredes de DC pueden dividirse en cuatro tipos esenciales según la arquitectura de distribución para la generación y el almacenamiento, como lo menciona Nasir *et. al.* (2017) estas son:

- Arquitectura de generación centralizada almacenamiento centralizado (CGCSA)
- Arquitectura de generación centralizada almacenamiento distribuido (CGDSA)
- Arquitectura de generación distribuida almacenamiento centralizado (DGCSA)

- Arquitectura de generación distribuida almacenamiento distribuido (DGDSA)

La arquitectura con mejor desempeño es como la mostrada en la figura 12:

Figura 12. Microrred con arquitectura DGDSA



Fuente: Nasir, Khan, Hussain, Mateen, y Ahmad (2017). *Solar PV-based Scalable DC Microgrid for Rural Electrification in Developing Regions*.

En este caso se menciona que la opción óptima es la generación Distribuida con almacenamiento distribuido, ya que esta arquitectura presenta menores pérdidas. Esta arquitectura es la que presenta menor cantidad de pérdidas debido a que hay un menor flujo de potencia entre los conductores, esto se debe a que al estar los puntos de generación y almacenamiento distribuidos;

la carga será alimentada desde el punto más cercano, evitando pérdidas por la circulación de energía en la red.

Se encuentra un resultado similar en el estudio de Khan, Schultz, y Nasir, (2019), donde indican que después de analizar dos esquemas diferentes para microrredes con corriente directa; radial y anillo, se encuentran menores pérdidas con una microrred conectada en anillo, aunque el costo inicial de implementación es mayor, las pérdidas se reducen, y la confiabilidad de la configuración en anillo es mayor comparada con la configuración radial. También parte de los resultados muestra que la generación descentralizada con almacenamiento descentralizado DGDSA muestra mayor eficiencia que la configuración de generación centralizada con almacenamiento centralizado CGCSA.

Entre los desafíos para implementar una microrred de tipo DGDSA se debe tener en cuenta que el sistema de protección debe ser bastante inteligente como para determinar el punto de falla y así aislarla de forma adecuada, también debe ser capaz de realizar flujos de carga y análisis de corto circuito en tiempo real. Otro escenario que debe tener en cuenta el sistema de control de una microrred es la operación en Isla, para el caso de que fallen partes del sistema que conecten la microrred al sistema principal.

También se consideran ciertas ventajas que pueden considerarse de este tipo de arquitectura Nasir *et. al.* (2017), los resultados de los análisis muestran que la arquitectura de almacenamiento distribuido propuesta puede mejorar la eficiencia de distribución en aproximadamente un 5 % más que otras arquitecturas LVDC.

La arquitectura DGDSA es escalable en términos de su diseño y operación. Se tiene una interconexión modular de varios hogares contribuyentes

(nanorredes) con control distribuido logrado a través del método por histéresis y caída de voltaje.

Esta generación y almacenamiento distribuidos de energía solar fotovoltaica permite compartir la energía propiciando cargas comunales más grandes que no están disponibles en otras arquitecturas.

Según con los resultados obtenidos por Nasir *et. al.* (2017), para un arreglo típico de aldea en una región en desarrollo con 40 hogares, se puede lograr una eficiencia de distribución del 96 % para un conductor típico de 2,5 mm², incluso con una tensión de distribución baja de 120 V CC (topología principal en anillo) con capacidad de reparto de carga máxima. Por lo tanto, la arquitectura propuesta es ideal para la electrificación rural en países en desarrollo, principalmente por la eficiencia que se alcanza, lo cual permite una reducción de costos importantes para este tipo de proyectos.

2.4. Análisis económico del uso de microrredes para la electrificación rural

Para hacer el análisis del uso de microrredes para la electrificación rural, se hace necesario considerar cómo la generación distribuida ha ayudado y puede ayudar a la electrificación, así como el impacto social asociado a estas implementaciones, y si existen desafíos sociales o económicos para este tipo de implementación.

2.4.1. Electrificación rural por medio de generación distribuida y análisis económico

Como lo expone Khodayar, (2017) las microrredes se han usado en diferentes países para mejorar el acceso a la electricidad de la población que se encuentra lejos de la red de distribución, se pone de ejemplo países como China, India, las filipinas, África, incluso Estados Unidos, donde se ha hecho uso de microrredes para dar acceso a millones de personas a la electricidad, además Estados Unidos también ha hecho uso de las microrredes para alimentar sitios de telecomunicaciones, industria remota o parques nacionales.

El mercado de las microrredes se espera que alcance 38.99 billones en 2022, con un crecimiento compuesto de 12.45 %, y se espera que las soluciones de microrredes remotas y aisladas tomen una porción considerable del mercado total, con un ingreso anual esperado mayor a \$25 millones para 2024 (Khodayar, 2017, p. 1).

Generalmente el crecimiento y desarrollo del mercado se ha dado con el apoyo de organizaciones como el Banco Mundial y la Organización de Naciones Unidas.

Algunos factores que pueden impactar la decisión de inversión por parte del sector privado son:

- Ubicación geográfica
- Subsidios disponibles
- Clientes potenciales

En varios estudios se menciona que una forma en que una microrred puede ser sostenible es involucrando a las poblaciones donde se encuentra instalada, de esta forma puede encargarse la misma población de la operación y parte del mantenimiento, otra opción para mantener las microrredes en funcionamiento es apoyándose en el gobierno, por ejemplo, con los incentivos que brindan estas energías, esto puede ayudar de forma considerable a la implementación de estas. Khodayar, (2017) menciona varios ejemplos de cómo en diferentes países se han podido desarrollar proyectos de microrredes aisladas, varios de los ejemplos involucran ayuda económica del gobierno o institución.

Algunas consideraciones técnico-económicas importantes para la implementación de microrredes son:

- Mezcla de tecnologías de generación
- Naturaleza de la carga
- Recursos financieros disponibles
- Recursos energéticos disponibles (solar, eólico, hidrotérmico, biomasa)
- Costo de la energía para los consumidores
- Confiabilidad del servicio
- Calidad del servicio

Cuando el número de usuarios es bajo y se encuentran dispersos geográficamente; la opción más viable involucra microrredes y sistemas de generación fotovoltaico, aunque esto siempre varía dependiendo del potencial solar de la zona en cuestión.

Para el posterior análisis se tiene en cuenta que el costo de la energía se ve afectado directamente por algunos factores:

- Costo capital
- Operación y mantenimiento
- Intereses
- Inflación
- Almacenamiento de energía
- Las soluciones que involucran combustibles fósiles
- Comportamiento de los consumidores

2.4.2. Impacto social de la electrificación por medio de microrredes

El impacto que causan los proyectos de electrificación rural en la sociedad y en las comunidades son ampliamente identificados por varios autores, por ejemplo Duvall, (2019) hace un estudio muy detallado de cómo la falta de electricidad afecta a las poblaciones en pobreza, y afecta de una forma aún más marcada a la población femenina, esto en parte por la cultura predominantemente machista, por lo que las mujeres deben cumplir con la mayoría de tareas del hogar, a esto sumándole la falta de electricidad hace que las mujeres no puedan disponer de su tiempo para actividades relacionadas con el desarrollo personal, educación, tampoco a actividades para el cuidado de la salud ni actividades remuneradas. También se comenta que la violencia contra la mujer aumenta en las poblaciones que no tienen acceso a la electricidad.

Dentro del impacto social, vale la pena mencionar el objetivo internacional de reducir el impacto medio ambiental y reducir las emisiones de CO₂, en muchos países, principalmente Europa, el tema medioambiental es uno de los que están influyendo más en el desarrollos de proyectos de generación distribuida. Por otro lado, las microrredes añaden fiabilidad a las redes de distribución, ya que introducen varias mejoras técnicas a las redes de distribución y al flujo de

potencia, aunque agregan también cierta complejidad operativa. Lastimosamente en el área rural de Guatemala, el tema de reducción de emisiones de gases no es una prioridad, ya que las poblaciones se encuentran en un estado de pobreza, e incluso en algunos casos su prioridad está relacionada con satisfacer las necesidades básicas y de supervivencia.

Otro de los impactos que pueden tener las microrredes es evitar el despoblamiento rural y evitar la migración de las personas a las ciudades, ya que estas deberían mejorar las condiciones de vida de la población, lo cual a su vez reduce la necesidad de migración de las personas.

2.4.3. Desafíos socioeconómicos para la implementación de las microrredes en el área rural

Lastimosamente al entrar a detalle con la realidad guatemalteca también se encontró información de estudios que dan resultados menos alentadores, como es el caso de Corsair (2013), en este se analizan casos de éxito y fracaso de sistemas de generación fotovoltaicos instalados en Guatemala, algunas de las conclusiones en los casos de fracaso muestran que cuando el nivel de pobreza de las comunidades es muy grande, las personas no pueden disponer de dinero para mantener el sistema de generación, ya que deben elegir si usar el poco ingreso que tienen en necesidades básicas, o el mantenimiento del sistema de generación de energía eléctrica, por ejemplo si las personas se ven expuestas a elecciones como: usar el capital para el mantenimiento del sistema y así tener luz eléctrica, o una visita urgente al doctor para curar una enfermedad; es evidente que las personas buscarán la supervivencia al acceso a la energía eléctrica. Prácticamente cuando las personas deben elegir entre sus necesidades básicas; el acceso a la electricidad se vuelve una de las menores preocupaciones, por lo

cual el éxito de los sistemas de generación no se alcanza en poblaciones con una alta condición de pobreza.

Este componente social en las comunidades rurales es uno de los mayores desafíos para la implementación de una microrred. Las condiciones de pobreza en las comunidades rurales aisladas son una fuerte barrera para la implementación de estos proyectos, ya que como lo menciona Núñez, (2013), la comunidad es un factor crítico en el logro de la supervisión y mantenimiento a bajo costo, lo que ayuda a incrementar la sustentabilidad en el largo plazo, por medio de un aumento de la resiliencia del sistema.

Como lo describe Núñez, (2013), en la propuesta de un social SCADA la componente social y la participación de la comunidad en la operación y mantenimiento del proyecto es vital para la resiliencia del sistema, esto visto para el caso de estudio en Guatemala y en conjunto con los análisis mencionados por Corsair, (2013), hace evidente que uno de los desafíos del desarrollo de una microrred en áreas rurales es lograr la participación de la comunidad donde se implementa el sistema.

2.5. Microrredes y el Mercado Mayorista

Como parte del estudio, se consideró la legislación que existe actualmente relacionada con las microrredes, la cual está algo limitada en Guatemala.

2.5.1. Marco regulatorio

La legislación de Guatemala desde la Constitución de la República de Guatemala considera algunos artículos enfocados en servicios básicos, en este caso el acceso a la energía:

Obligaciones del Estado. Son obligaciones fundamentales del Estado:

- Promover el desarrollo económico de la nación, estimulando la iniciativa en actividades agrícolas, pecuarias, industriales, turísticas y de otra naturaleza.
- Adoptar las medidas que sean necesarias para la conservación, desarrollo y aprovechamiento de los recursos naturales en forma eficiente.

Se declara de urgencia nacional, la electrificación del país, con base en planes formulados por el Estado y las municipalidades, en la cual podrá participar la iniciativa privada.

Se puede observar que el tema energético es de los ejes más importantes para el desarrollo de un país, por lo que el marco regulatorio y la legislación contempla varias leyes y normas con el fin de proveer a la población del país energía eléctrica de calidad y a un precio óptimo.

Algunos de los pasos orientados al cuidado del medio ambiente han estado con la generación distribuida renovable, esta ha estado tomando auge en Guatemala desde hace varios años, desde que se desarrolló la normativa para regular la instalación de generadores distribuidos renovables y también cuando se definieron los incentivos para la generación distribuida renovable:

- Norma técnica de Generación Distribuida Renovable NTGDR
- Incentivos para el desarrollo de proyectos de energías renovables

En el 2003 se crea una ley enfocada en incentivar el desarrollo de proyectos con energía renovable en Guatemala

Según el Decreto 52-2003 (2003):

- Exención de derechos arancelarios para las importaciones, incluyendo el Impuesto al Valor Agregado -IVA-, cargas y derechos consulares sobre la importación de maquinaria y equipo, utilizados exclusivamente para la generación de energía en el área donde se ubiquen los proyectos de energía renovable.
- Exención del pago del Impuesto Sobre la Renta
- Exención del Impuesto a las Empresas Mercantiles y Agropecuarias -IEMA-. (p. 96)

Posteriormente en 2014 surgió la Norma técnica de Generación Distribuida Renovable, que será abordada en el siguiente apartado.

2.5.2. Normativa técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoproductores con excedentes de energía

Esta norma establece todos los lineamientos que deben cumplir las distribuidoras y los Generadores distribuidos renovables y Usuarios autoproductores con excedentes de energía para la conexión, operación y control y comercialización de energía eléctrica con fuentes renovables.

En Guatemala es necesario cumplir con lineamientos para la instalación de la Generación distribuida renovable, como se ve en la tabla siguiente:

Tabla I. Lineamientos para la instalación de generación distribuida renovable en Guatemala

No.	Lineamientos para la instalación de generación distribuida renovable en Guatemala
1	Presentar ante el Distribuidor la solicitud de Dictamen de Capacidad y Conexión, utilizando el formulario autorizado adjuntando la información indicada en el mismo.
2	Entregar la información técnica de sus instalaciones, solicitada por el Distribuidor o la CNEE, para la adecuada evaluación de la información del Interesado, relacionada con el proyecto que desea conectar.
3	Construir y cubrir los costos de la línea y equipamiento o instalaciones, necesarios para llegar al Punto de Conexión, incluyendo el último elemento de maniobras entre las instalaciones del GDR y las existentes del Distribuidor.
4	Cumplir las condiciones que la CNEE establezca en la resolución de autorización, tanto para la debida conexión como para la operación de sus instalaciones.
5	Cubrir los costos de las modificaciones o ampliaciones de las instalaciones de distribución, adyacentes al Punto de Conexión, y que la CNEE, considerando el Dictamen de Capacidad y Conexión del Distribuidor, determine y autorice, después de la evaluación pertinente de dichos costos.
6	Instalar sistemas de protección y de desconexión para la seguridad de las personas y sus instalaciones, así como para evitar daños al Sistema de Distribución y de otros usuarios.
7	Cumplir con las tolerancias permitidas para los indicadores de calidad, establecidos en las NTSD, que le sean aplicables.
8	Entregar la información que la CNEE requiera, en la forma y tiempo que ésta disponga, para efectos de dar cumplimiento a lo dispuesto en la LGE, el RLGE y la presente Norma.
9	Cumplir otros requerimientos que le mande la LGE, el RLGE, esta Norma y la CNEE.
10	Registrar en la Dirección General de Energía del Ministerio de Energía y Minas, las cotas como central generadora menor o igual a cinco megavatios (5 MW), para proyectos de Generación Distribuida Renovable que utilicen tecnología hidráulica. Esta acción la deberá realizar el Interesado previo a presentar su solicitud de Dictamen de Capacidad y Conexión al Distribuidor, para garantizar que no exista conflicto de cotas con otros proyectos en el mismo río.

Continuación tabla I.

- | | |
|----|---|
| 6 | Instalar sistemas de protección y de desconexión para la seguridad de las personas y sus instalaciones, así como para evitar daños al Sistema de Distribución y de otros usuarios. |
| 7 | Cumplir con las tolerancias permitidas para los indicadores de calidad, establecidos en las NTSD, que le sean aplicables. |
| 8 | Entregar la información que la CNEE requiera, en la forma y tiempo que ésta disponga, para efectos de dar cumplimiento a lo dispuesto en la LGE, el RLGE y la presente Norma. |
| 9 | Cumplir otros requerimientos que le mande la LGE, el RLGE, esta Norma y la CNEE. |
| 10 | Registrar en la Dirección General de Energía del Ministerio de Energía y Minas, las cotas como central generadora menor o igual a cinco megavatios (5 MW), para proyectos de Generación Distribuida Renovable que utilicen tecnología hidráulica. Esta acción la deberá realizar el Interesado previo a presentar su solicitud de Dictamen de Capacidad y Conexión al Distribuidor, para garantizar que no exista conflicto de cotas con otros proyectos en el mismo río. |
| 11 | Cuando el GDR opte por participar en la venta de potencia y solicite la asignación de la Oferta Firme y Oferta Firme Eficiente, deberá habilitarse en el Mercado Mayorista como Integrante y cumplir con lo establecido en las NCC y NCO. |
| 12 | Incluir en la solicitud de Dictamen de Capacidad y Conexión todos los documentos requeridos por esta Norma. |
| 13 | Que la información del proyecto presentada en la solicitud de Dictamen de Capacidad y Conexión sea igual a la presentada a las diferentes entidades que intervienen en el proceso de autorización, entre otras: nombre, ubicación, potencia, características técnicas de la línea de conexión y cuando corresponda, las cotas. |
| 14 | Realizar la solicitud de Dictamen de Capacidad y Conexión previo al inicio de la construcción de su proyecto. |

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2014). *Norma técnica de Generación Distribuida Renovable y usuarios autoproductores con excedentes de energía.*

Se observa que los requerimientos y el enfoque de la norma está orientado a la conexión de generadores a la red de distribución, pero no contempla la parte principal de este estudio, que son microrredes con generación distribuida que se

encuentran lejos de las redes de distribución, por lo que el caso de análisis se encuentra fuera de la norma NTGDR.

Para el análisis de este trabajo se considerará la posibilidad de que en un futuro la microrred pueda participar en el mercado mayorista, previendo la existencia de un modelo de negocio para atraer a la inversión privada, pero como se mencionó esto tendría que ser como un agente Generador, Comercializador o Gran Usuario, ya que no es posible contemplarlo como un GDR mientras se mantenga aislado.

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Características del estudio

Para comprender mejor la investigación se detallan algunas características que posee la misma.

3.1.1. Diseño

El diseño adoptado es no experimental, pues las variables a analizar no son modificables.

3.1.2. Enfoque

El enfoque del estudio es mixto, ya que considera elementos cuantitativos y cualitativos. Desde el punto de vista cuantitativo se tiene un análisis técnico económico que determina la viabilidad del modelo propuesto de microrredes a ser implementadas en áreas rurales. Desde el punto de vista cualitativo se tiene un breve estudio social de las condiciones en que se encuentra una población que fue usada de referencia. Con las condiciones encontradas para la población de estudio se evaluaron aspectos económicos, con lo cual se comenzó a abordar el enfoque cuantitativo. Entrando de lleno con el enfoque cuantitativo se buscó definir la viabilidad técnica y económica para saber la medida en que la implementación de microrredes puede mejorar la electrificación rural en Guatemala, desde un punto de vista técnico se determinaron las características para implementar microrredes, y desde el punto de vista económico se identificaron los costos mínimos para la implementación y operación de

microrredes, y con este se evalúa la viabilidad para la implementación y mantenimiento de microrredes en comunidades. Para el análisis económico se encontró una relación directa con las condiciones sociales de las comunidades, ya que se de la información recopilada y analizada de la población de estudio se determinó que el nivel de pobreza es una limitante para la implementación y operación de una microrred, ya que como lo expone Corsair (2013) si las poblaciones se encuentran ante decisiones económicas complicadas lo más probable es que decidan usar su capital en necesidades básicas en lugar de usarlo para el mantenimiento y operación de la microrred.

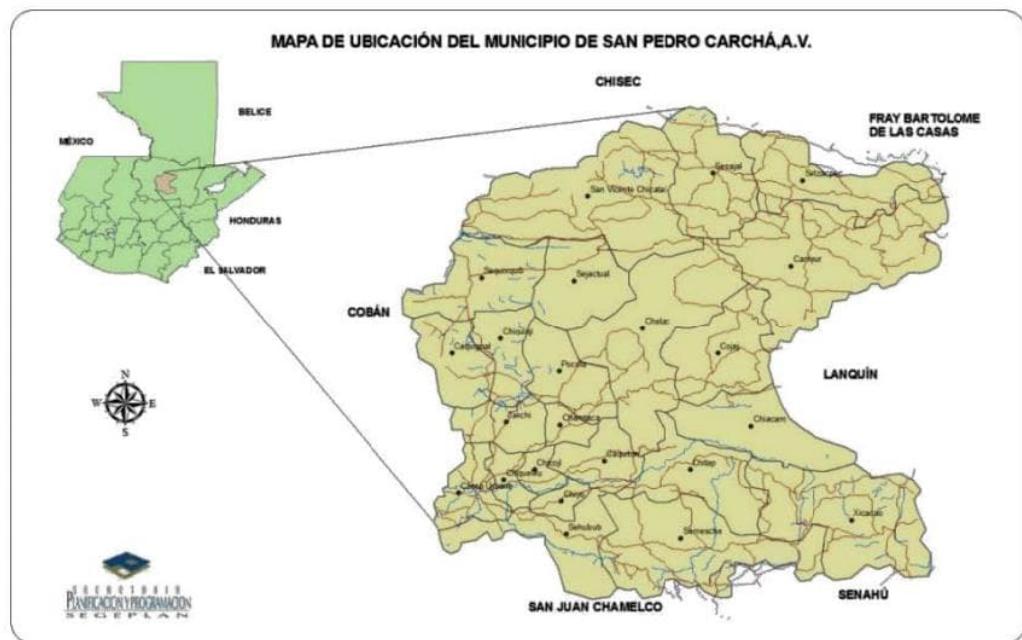
3.1.3. Alcance

El alcance de esta investigación es transeccional descriptivo, ya que los datos recolectados son únicos en el tiempo, para los años 2021 y 2022. Y estos mismos datos indican el estado de la electrificación rural, y el estado social y económico de la población en estudio para este momento en el tiempo. Con esta información se evalúa la viabilidad de implementación de la propuesta técnica.

3.1.4. Unidad de análisis

La unidad de análisis es el sistema eléctrico de Guatemala, para el estudio se toman regiones representativas, como lo es Alta Verapaz, un departamento de la región centro-norte de Guatemala. Para el estudio se analiza la viabilidad de implementar microrredes según las cualidades geográficas, sociales y económicas de la población del municipio de San Pedro Carchá, dentro del departamento de alta Verapaz. A continuación, se muestra el mapa con el municipio tomado de referencia:

Figura 13. Mapa con la ubicación del municipio de San Pedro carchá, así como sus regiones y límites geográficos



Fuente: Instituto Nacional de Estadística Guatemala (2014). *San Pedro Carchá*.

Para el análisis se toman los datos de la población de San Pedro Carchá, en el departamento de Alta Verapaz. De acuerdo con la información recibida de la Unidad de información pública de la municipalidad de San Pedro Carchá, se encuentra que las siguientes regiones de San Pedro Carchá carecen de electricidad:

- Semesché
 - Chitoc
 - Centro Guadalupe
 - San Juan Bosco
 - Setzacpec

- Sequixib

Los poblados que poseen muy poca electrificación son:

- Chitap
- Chelac
- Cojaj
- Campur
- Sesajal
- San Vicente chicatal
- Chiacam
- Xicacao
- San Vicente Campur

3.2. Variables

Las variables en estudio se describen a continuación:

Tabla II. Variables del estudio

Variable	Definición teórica	Definición operativa	Categórica/Numérica	Manipulable/Observable	Escala de medición
Tipos de recursos aprovechables para generación	Que condiciones técnicas y ambientales se requieren para implementar microrredes	Categorías	Categórica policotómica	Observable	Nominal

Continuacion tabla II.

Beneficios a corto/mediano plazo. (técnico, social, o económico)	Cómo mejora la población, criterios sociales	Categorías/beneficios sociales	Categórica policotómica	Observable	Nominal
Costos de implementación (GTQ)	Costo total del proyecto.	Unidad monetaria. Quetzales	Numérica Contínua	Observable	Medición de razón
Beneficio económico al incorporar al mercado	Beneficio que tendrá un proyecto al incorporar la generación en el mercado mayorista	Unidad monetaria. Quetzales	Numérica Contínua	Observable	Medición de razón

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Office.

3.3. Fases de la investigación

La investigación consta de 5 fases, en las primeras dos se abarca un enfoque técnico y social, y en las siguientes tres fases se abarca un enfoque más económico.

3.3.1. Fase 1: definición técnica del modelo de microrred como propuesta para el uso en áreas rurales

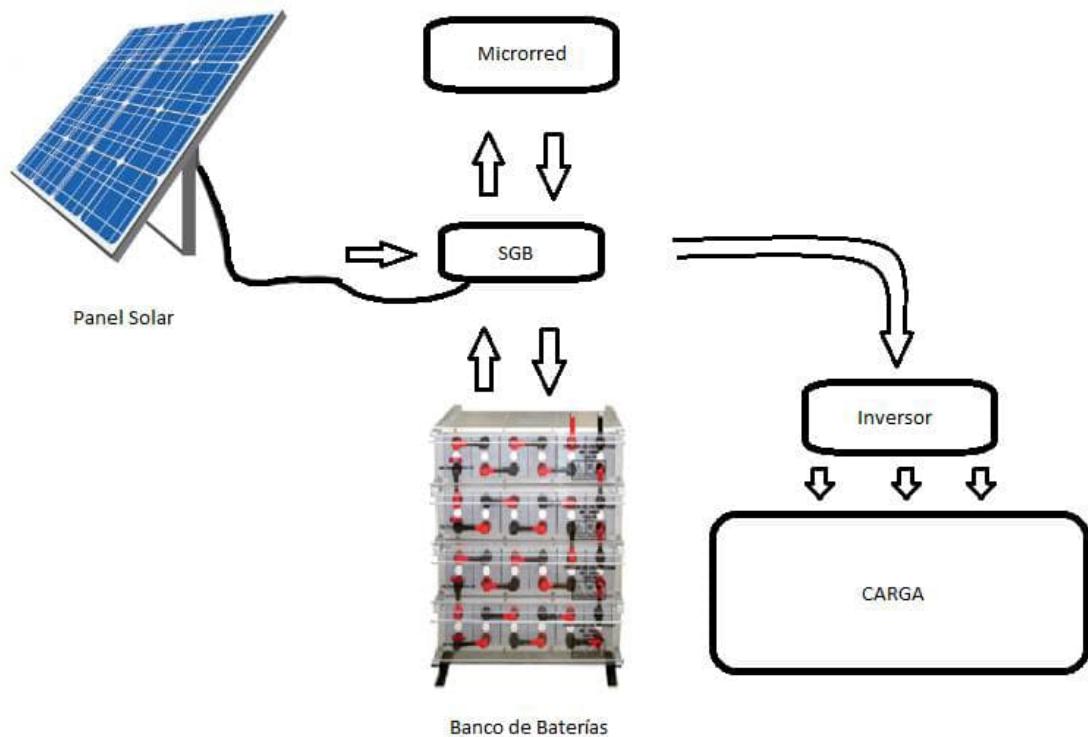
Haciendo uso de la información mostrada en Nasir, Iqbal, Khan, Vasquez, y Guerrero, (2020), así como Ubilla, Jiménez, Hernández, y Reyes, (2014) y Khan, Schultz, y Nasir, (2019):

Se determinan las características de la microrred. Se toma de referencia el modelo eléctrico de cada casa, para esto se considera que está conformado principalmente de los siguientes elementos:

- Carga: para la carga se toma en cuenta una residencia relativamente pequeña, y se calculan dos factores críticos para el suministro eléctrico, como lo son la potencia y la energía.
- Fuente de generación: para el caso de análisis se consideran paneles solares (son considerados como una fuente de voltaje DC).
- Cargador de baterías (SGB).
- Banco de baterías (carga / fuente de voltaje DC).
- Barras, y líneas, son conductores eléctricos que conectan las casas entre sí.
- Inversor DC a AC, se propone para que las cargas a conectar no sean de un origen especial

El modelo de cada casa se muestra a continuación, en este caso se ve de forma muy general, cómo interactúan los elementos mencionados previamente:

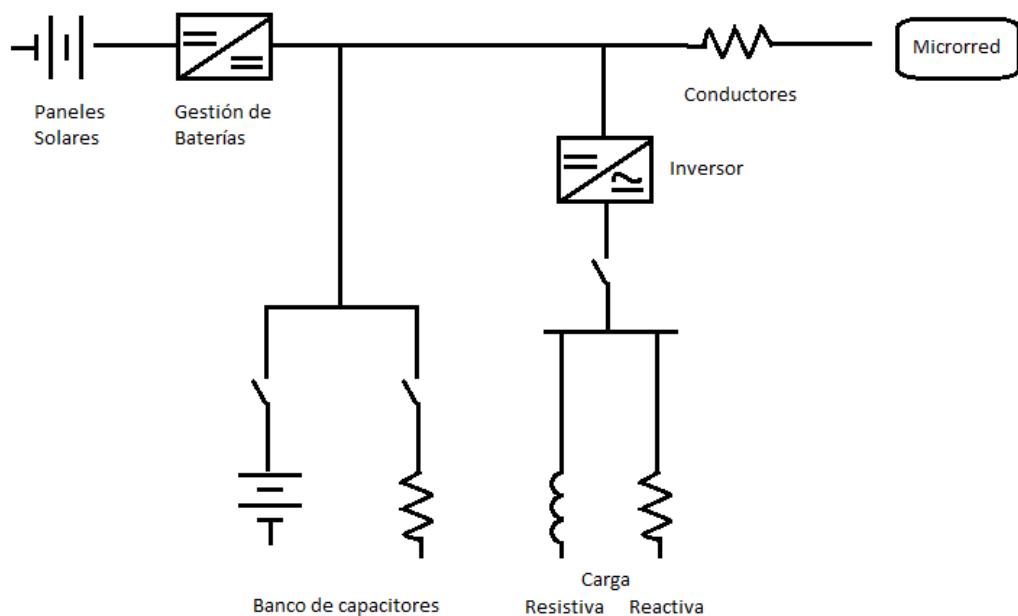
Figura 14. Esquema de un sistema de generación solar con un sistema de almacenamiento



Fuente: elaboración propia, empleando Paint.

Cada casa tiene el equivalente eléctrico como el que se muestra en la figura 15. Con este equivalente eléctrico podemos modelar cada casa de las que formarán parte de la microrred, y determinar el costo de implementación de esta, para una cantidad determinada de casas que forman un poblado (teórico).

Figura 15. Diagrama eléctrico de un sistema de generación solar con un sistema de almacenamiento



Fuente: elaboración propia, empleando Paint.

Para el análisis del modelo propuesto se determinan los valores aproximados de consumo para dos tipos de casa, una con un consumo bajo de energía, y la segunda para una casa con un consumo medio/bajo de energía.

Para el análisis se consideran 10 casas como parte de la microrred, de las cuales 6 tendrán un sistema de generación, y 4 tendrán únicamente cargas.

- Tamaño de las cargas

Para la determinación del tamaño de las cargas se consideraron dos tipos de vivienda, la primera es una casa con un consumo medio-bajo de energía, la cual tendría las siguientes cargas:

- 4 luminarias led
- 1 televisores
- 1 radios
- 1 refrigeradora
- 3 cargas temporales (dispositivos recargables)

Tabla III. Consumo medio de una vivienda con un consumo medio-bajo de energía

Item	Descripción	Consumo por unidad (W)	Cantidad	Consumo total (W)	Energía diaria (Wh)	Energía mensual (kWh)
1	Iluminación	11	4	44	264	7.92
2	Televisión	120	1	120	720	21.6
3	Radio	15	1	15	120	3.6
4	Refrigeradora	350	1	350	2100	63
5	Carga temporal	5	3	15	45	1.35
Total		501		544	3249	97.47

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

El segundo tipo es de un consumo bajo de energía, para el cual se consideraron las siguientes cargas:

- 2 luminarias Led
- 2 radios
- 1 refrigeradora
- 1 cargas temporales (dispositivos recargables)

Tabla IV. Consumo medio de una vivienda con un consumo bajo de energía

Item	Descripción	Consumo por unidad (W)	Cantidad	Consumo total (W)	Energía diaria (Wh)	Energía mensual (kWh)
1	Iluminación	11	2	22	132	3.96
2	Televisión	120	0	0	0	0
3	Radio	15	1	15	120	3.6
4	Refrigeradora	350	1	350	2100	63
5	Carga temporal	5	1	5	15	0.45
Total		501		392	2367	71.01

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Las tablas III y IV se construyeron con la información del consumo promedio de electrodomésticos adquirido de la herramienta *on line* de Energuate, y buscando consumos promedio de electrodomésticos.

Vemos que los datos obtenidos en la tabla coinciden bastante bien con la información mostrada en el CNEE, Comisión Nacional de Energía Eléctrica, que muestra que el consumo promedio de los usuarios de DEORSA es menor a 100 kWh al mes. Parece razonable considerar que las casas con cargas bajas se

encuentren con valores cercanos a 70 kWh mensuales. Otro dato importante es que este consumo es el aproximado para familias de hasta 4 integrantes.

Determinar las características del modelo base para la microrred:

- Cantidad de la generación distribuida (MW):

La cantidad de Generación distribuida necesaria es; la suma de la energía necesaria para alimentar la carga, más el consumo que se da en los conductores, más las pérdidas asociadas al sistema.

$$G = C + R + P \quad (1)$$

Donde:

G=potencia requerida

C= potencia de la carga

R= resistencia (pérdidas de potencia en los conductores)

P= pérdidas del sistema

Para la estimación de la cantidad de generación se usó de referencia la carga máxima del sistema, que corresponde en el caso de 10 casas; donde 6 casas son de consumo medio y las otras 4 son de un consumo bajo corresponde a:

4.832 KW.

También se requiere el dato medio de radiación solar del lugar de análisis. De acuerdo con el reporte MEM, Ministerio de Energía y Minas (2018), el

departamento de Alta Verapaz tiene en promedio una radiación solar de entre 4.5 y 5.5 kWh/m²/día.

Con estos dos datos se toman los datos de los paneles solares del proveedor:

- Una instalación para con 3 paneles solares de 250W por casa
- 10 Baterías de 12V y 100 A
- 1 Inversor de 1000W

Conociendo la potencia estimada de la carga, esto significa que, si sólo 10 casas poseen un grupo de paneles, cada uno debe generar debe generar por lo menos 806 W de potencia.

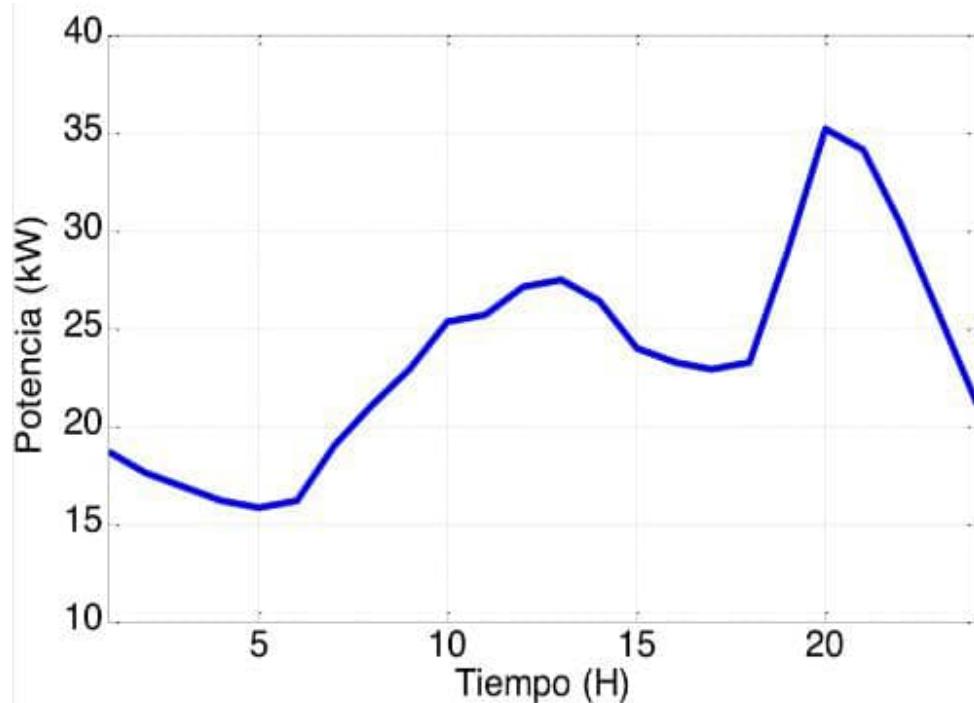
Tomando la ecuación 1 de referencia podemos calcular el total de generación requerido del sistema:

$$G=806\text{kW}+ 81\text{kW}$$

Esto significa que cada casa, o grupo de paneles debe generar 887 W de potencia.

Por otro lado, para la implementación se debe tener en cuenta el perfil de carga horaria del sistema, como se menciona en Ramos *et. al.* (2018). Este perfil de carga nos ayudará a definir de forma más precisa la carga de la microrred. Para este estudio los cálculos se realizaron con la carga máxima del sistema para todo el dimensionamiento, pero vemos que también es necesario el análisis de la carga horaria de la microrred, y poder cubrirlo con el perfil de generación horaria de una microrred.

Figura 16. Perfil de carga horaria de un poblado genérico



Fuente: Ramos, et. al. (2018). *Análisis de factibilidad técnico-económico de microrredes que integran celdas de combustible en zonas no interconectadas de Colombia.*

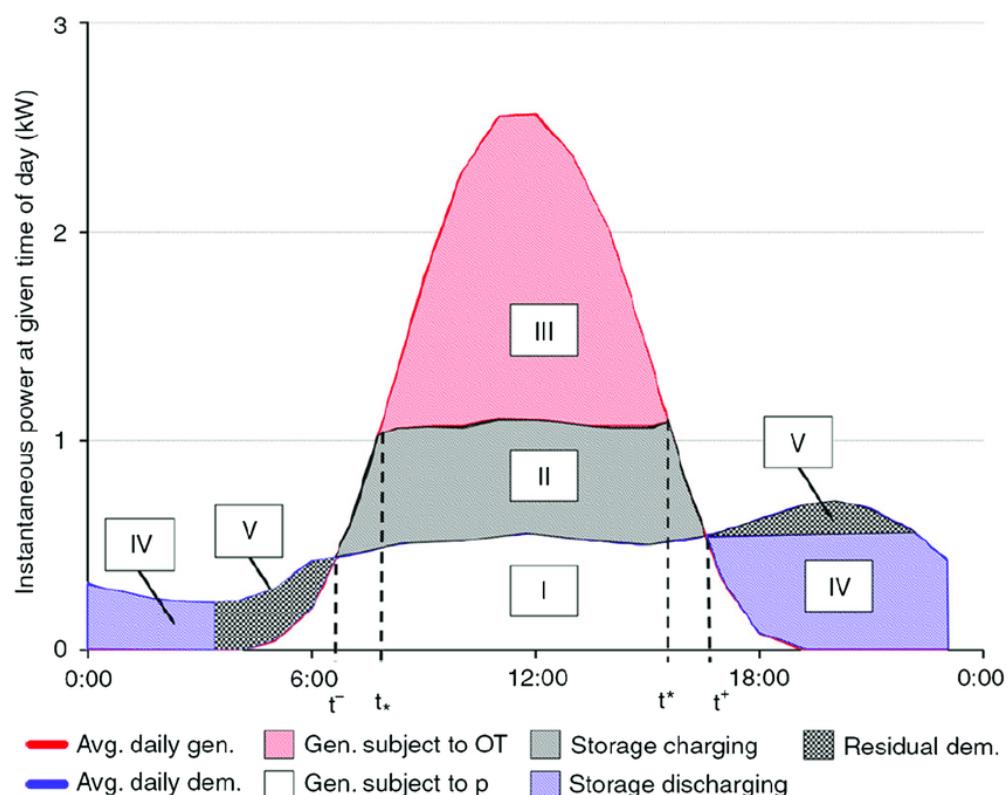
Para el caso del perfil de generación se requiere generar una curva de generación horaria con la información detallada de los componentes usados para el proyecto de microrred, con el cual se debe obtener un perfil como el mostrado en la figura 17.

Con los perfiles de carga y generación se deben transponer las curvas de carga y generación con el fin de asegurar que los componentes seleccionados son capaces de cubrir la carga durante todo el día, en la figura 17 se observa cómo se usa la energía durante un día soleado, y cómo se cubre la carga en los

horarios ausentes de luz solar, IV y V de la figura 17, se requiere cubrir la demanda con el banco de baterías.

El desarrollo de los perfiles de generación y carga horarios de la microrred quedan fuera del alcance de este estudio, pero deben tenerse en cuenta para el desarrollo de un proyecto de electrificación con el uso de microrredes.

Figura 17. Perfil de generación horaria de un poblado genérico



Fuente: Raugei, et. al. (2020). *What Are the Energy and Environmental Impacts of Adding Battery Storage to Photovoltaics? A Generalized Life Cycle Assessment.*

- Tamaño y longitud de los conductores:

Para la determinación de la longitud de los conductores se considera una separación de los grupos de viviendas de aproximadamente 100 m entre casas continuas, y entre casas cercanas de 15 m con esto podemos incorporar la resistencia del cable al modelo del estudio.

En la tabla V se muestra la longitud y características de los conductores:

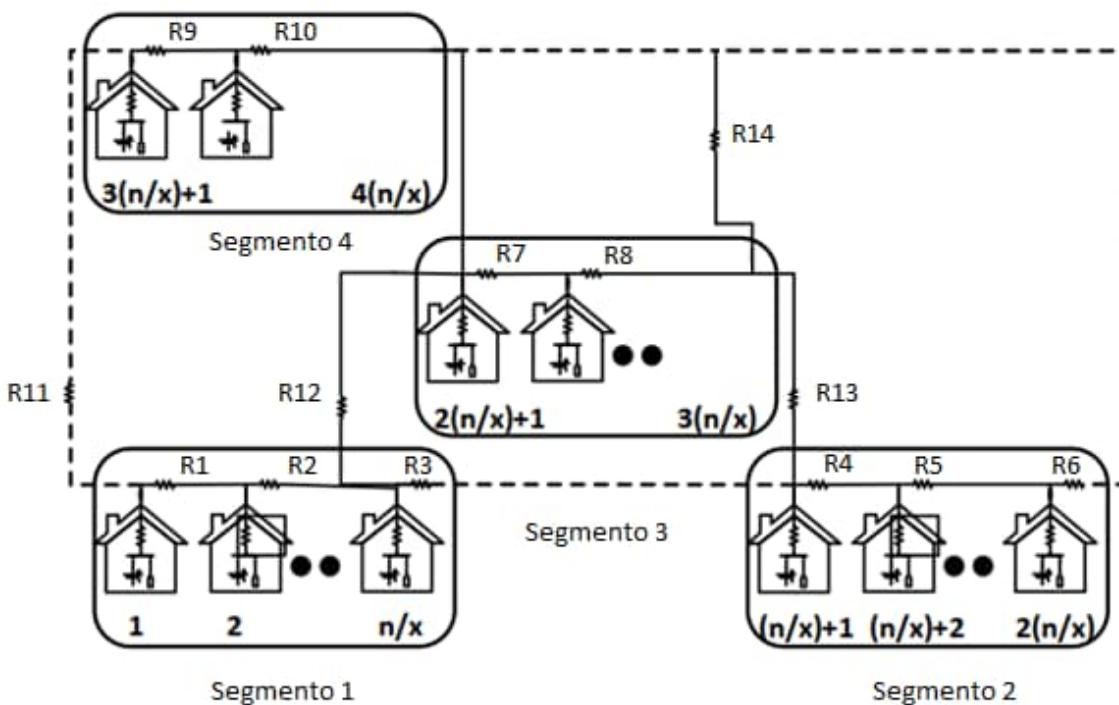
Tabla V. Resistencia prevista para los conductores de la microrred

No	Longitud	Calibre	Resistencia (Ohm)
R1	15	12	91.79
R2	15	12	91.79
R3	100	12	611.90
R4	15	12	91.79
R5	15	12	91.79
R6	100	12	611.90
R7	15	12	91.79
R8	100	12	611.90
R9	15	12	91.79
R10	100	12	611.90
R11	100	12	611.90
R12	100	12	611.90
R13	100	12	611.90
R14	100	12	611.90

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Con esto es posible analizar el caso de estudio de 10 casas con la arquitectura de red propuesta por Nasir *et. al.* (2017). En la figura 18 se muestra la red propuesta para este caso de estudio.

Figura 18. Modelo propuesto de microrred, para implementar en áreas rurales, este tiene generación distribuida, y un sistema de almacenamiento distribuido



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

De acuerdo con la arquitectura propuesta por Nasir *et. al.* (2017), se analiza una arquitectura en anillo, con generación descentralizada, que tiene cargas y baterías en la mayor parte de los nodos, y puede poseer algunos nodos con cargas comunales.

3.3.2. Fase 2: definición de la población de muestra y búsqueda de datos

Para la adquisición de información se considera la población del área rural de Alta Verapaz, principalmente el municipio de San Pedro Carchá, ya que es un municipio con áreas de poca electrificación o nula electrificación.

Se solicitó información a la Unidad de información pública de San Pedro Carchá, sobre las poblaciones que no cuentan con electricidad en el municipio, ellos entregaron un listado con el estado de la electrificación de las poblaciones dentro del municipio (Unidad de Información Pública San Pedro Carchá, 2021).

Al analizar la información recibida, se encuentra que todo el norte y sur de San Pedro carchá tiene poca o nula electrificación, en el mapa de la figura 19. Se marcó con rojo las zonas donde según la información recibida hay nula electrificación dentro del municipio, en la figura 19 se muestra el detalle.

En la figura 19 las zonas marcadas en rojo tienen poca o nula electrificación. Con esta figura se pueden identificar los poblados que requieren electrificación y con los cuales se puede analizar las distancias necesarias para la construcción de una línea de transmisión para la electrificación de dichas zonas.

Figura 19. Zonas con poca o nula electrificación en el municipio de San Pedro Carchá



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

De acuerdo con la información recibida de Unidad de Información Pública San Pedro Carchá, (2021), se encuentra que las siguientes regiones de San Pedro Carchá carecen de electricidad:

- Semesché
- Chitoc

- Centro Guadalupe
- San Juan Bosco
- Setzacpec
- Sequixib

Los poblados que poseen muy poca electrificación son:

- Chitap
- Chelac
- Cojaj
- Campur
- Sesajal
- San Vicente chicatal
- Chiacam
- Xicacao
- San Vicente Campur

Adicional a esto se consiguió información de INE, Instituto Nacional de Estadística, (2015), de donde se tomaron los siguientes datos. La población del municipio de Carchá: 261,102 habitantes, de los cuales la distribución de la población es como se muestra en la tabla VI.

Tabla VI. Distribución de población según rangos de edad. Municipio de San Pedro Carchá

Ambos sexos	Año 2022
Total	261,102
0 a 4	31,683
5 a 9	30,280

Continuación tabla VI.

10 a 14	30,388
15 a 19	26,653
20 a 24	28,407
25 a 29	23,863
30 a 34	20,347
35 a 39	17,044
40 a 44	13,224
45 a 49	10,352
50 a 54	7,677
55 a 59	5,417
60 a 64	4,590
65 a 69	3,839
70 años o más	7,338

Fuente: elaboración propia, con datos tomados de Instituto Nacional de Estadística, (2015).

Estimaciones y proyecciones municipales 2015-2035. Población total.

De estos datos es importante notar que la población que se encuentra en un rango de edad con la posibilidad de trabajar de 15-64 años son 157,574 habitantes.

Del compendio estadístico de Educación 2015 INE, Instituto Nacional de Estadística, (2015) se encontró que en Alta Verapaz se tienen los siguientes datos estadísticos relacionados con educación:

- Inscritos en el ciclo de educación preprimaria 30620 personas
- Tasa neta de cobertura del ciclo de educación preprimaria 34.8 %
- Inscritos en el ciclo de educación primaria 212762 personas
- Tasa neta de cobertura del ciclo de educación primaria 79 %

- Tasa de Repitencia a nivel primaria 16.5 %
- Tasa de sobre edad a nivel primaria 30.9 %
- Tasa de deserción a nivel primaria 2.8 %
- Tasa de aprobación a nivel primaria 77.1 %
- Inscritos en el ciclo de educación básico 40155 personas
- Tasa neta de cobertura del ciclo de educación básico 22.6 %
- Tasa de Repitencia a nivel básico 4.2 %
- Tasa de sobre edad a nivel básico 41.6 %
- Tasa de deserción a nivel básico 6.5 %
- Tasa de aprobación a nivel básico 70.5 %
- Inscritos en el ciclo de educación diversificado 17128 personas
- Tasa neta de cobertura del ciclo de educación diversificado 10.7 %
- Tasa de Repitencia a nivel diversificado 1.4 %
- Tasa de sobre edad a nivel diversificado 42.6 %
- Tasa de deserción a nivel diversificado 3.1 %
- Tasa de aprobación a nivel diversificado 71.1 %
- Proporción de nacimiento en Madres sin escolaridad 51.2 %
- Promedio de hijos en madre sin educación 3.8

A pesar de que el enfoque de este estudio no está relacionado directamente con educación, se observa que las estadísticas de Alta Verapaz relacionadas con educación no son buenas, más bien son las de las más bajas a nivel nacional. Esto sin considerar específicamente los departamentos con menor electrificación. A consideración del Autor, hay una relación directa entre estos porcentajes y el acceso a la electrificación, pero hallar esta relación queda fuera del alcance de este estudio. Es importante mencionar que la electricidad proporciona la oportunidad para hacer uso de herramientas que nos dan acceso a la electricidad.

De acuerdo con Iarna, Instituto de Investigación y Proyección sobre Ambiente Natural y Sociedad, (2017), se tienen los indicadores sociales en San Pedro Carchá:

- Población económicamente activa 39.89 %
- Tasa de desempleo 71 %
- Pobreza 88.4 %
- Pobreza extrema 42.8 %
- Desnutrición crónica 49.3 %

Estos indicadores nos muestran que la población de San Pedro Carchá tiene un alto porcentaje de pobreza y extrema pobreza, y el porcentaje de población económicamente activa es bajo. Esto es una complicación para que la ejecución del proyecto sea autosostenible, y que funcione por medio de un ente privado, prácticamente limita la ejecución del proyecto a entidades estatales.

A su vez estos indicadores muestran que el acceso a la electricidad puede ayudar a que la población pueda realizar otras actividades económicas, con lo cual se aprecia que el acceso a la electricidad puede impulsar desde diferentes aristas el desarrollo humano de San Pedro Carchá.

3.3.3. Fase 3: cuantificación de costos de la microrred propuesta y definición de la inversión

Para la determinación de la microrred se procede a buscar información con proveedores de componentes eléctricos o tecnología para la construcción de la microrred. Con esta información se detallan los elementos que conformarán la microrred y con estos, se obtienen los costos costo para la construcción de la microrred.

Para la determinación de los costos se utiliza una estimación de elementos usados por una familia de 4 cuatro integrantes; como se hizo mención en la fase 1, para la determinación de la carga.

Para la proyección de costos y dimensionamiento de una microrred, se considera un poblado de 10 casas, con un promedio de 4 integrantes por casa. Se consideran además dos tipos de casas; uno con una demanda de potencia media-baja, la cual se considera que debería tener una instalación de generación solar, y el otro tipo es una con una demanda baja de potencia, a la cual no se le considera una instalación de generación solar.

Con estas consideraciones se construyen las tablas VII y VIII.

Tabla VII. Costo para la implementación de la microrred

Item	Descripción	Cantidad (por casa)
1	Unidad de generación (panel solar)	4
2	Batería 12 V	10
3	Conductores	15
4	Conductores entre casas	100 m
5	Plafoneras	4
6	Tomas	3
7	Interruptor para luminarias	2
8	Inversores	1
9	Iluminación	4
10	Interruptores AC	3
11	Interruptores DC	2

Continuación tabla VII.

12	Ducto eléctrico	100 m
13	Tablero para Breaker de 8 circuitos	1
14	Infraestructura para baterías	1
15	Infraestructura para Paneles	1

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Con los datos del costo del sistema también se considera el costo de la operación y el mantenimiento de este, principalmente el cambio de los elementos principales del sistema y el cambio de algunos elementos que seguramente fallará de forma esporádica.

Los datos que se consideran para hacer una proyección de los costos de operación y mantenimiento se muestran en la tabla VIII.

Tabla VIII. Costo de la microrred en un período de 30 años

Tarea de mantenimiento	Costo en GTQ
Costo de implementación	111,962.00
Costos asociados a limpieza e inspección semestral	12,000.00
Reemplazo de equipo inversor	5,850.00
Reemplazo de baterías	13,000.00
Reemplazo y monitoreo técnico del sistema.	10,000.00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

3.3.4. Fase 4: análisis técnico-económico de la solución

Para el análisis técnico económico de la solución se hace un cálculo del costo de la solución y se plantea un período de tiempo durante la operación del sistema, para este análisis de consideran 30 años, que es un período de vida útil para los paneles solares, así como las condiciones que requiere la comunidad o el poblado para implementar la solución.

Para esto se usan los indicadores socioeconómicos del poblado en estudio, que es la población de San Pedro Carchá. Y se determina si este poblado es capaz de implementar y mantener una microrred.

3.3.5. Fase 5: comparación del modelo con otro previendo la conexión a la red de distribución e interacción con el mercado eléctrico

En esta fase se hace la comparación de la solución técnica propuesta para la implementación de una microrred y la construcción de una línea de 69 KV desde la cabecera municipal de San Pedro Carchá, hasta dos puntos de referencia dentro de carcha, al norte hasta Gesajal y al sur con Xequixquib.

Para esta comparación se usaron de referencia los datos de costos de construcción de algunas líneas de transmisión del SIN en 69 KV. Se encontraron los datos de proyectos de construcción de líneas de 69 KV en áreas rurales; se encontró información de dos líneas de transmisión construidas por el INDE, de las cuales los datos se muestran a continuación:

Se hace uso del reporte del INDE de la construcción de la línea de transmisión de 69 KV; según Instituto Nacional de Electrificación (2013):

- L. T. 69 Kv. Sacapulas – Chicamán [30-60]km
- \$ 2,448,390,23 = Q. 19,097,443.79
- Personas beneficiadas: 978744 habitantes.

- L.T. Libertad 1 - Libertad 2. 70km
- \$ 6,539,992.15 = Q. 51,011,938.77
- Personas beneficiadas: 638,296 habitantes.

Tabla IX. Costo estimado para la construcción de líneas de transmisión en el Municipio de San Pedro Carchá

Descripción	Longitud km	Precio (Q)
L. T. 69 Kv. Sacapulas – Chicamán	45	Q19,097,443.79
L. T. Libertad 1 - Libertad 2.	70	Q51,011,938.77

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Es posible mencionar algunas características de este tipo de proyectos:

- Alta población beneficiada
- Costo de implementación alto
- Alto impacto ambiental
- Complejidad de los proyectos debido a la conflictividad social

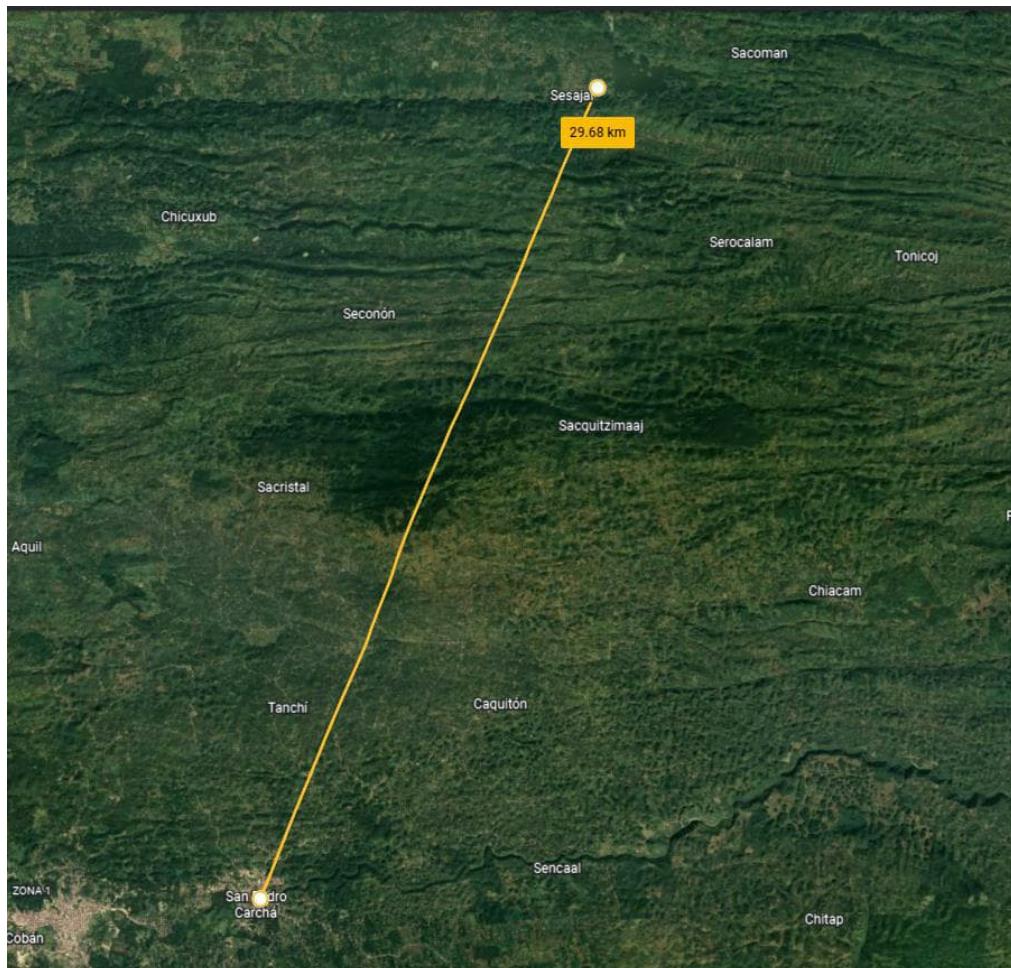
Cabe mencionar varios aspectos de esta aproximación, el primero es que los datos encontrados del valor de construcción de una línea de transmisión son del año 2013.

Otro dato es que las líneas de transmisión requerirán la construcción de una subestación eléctrica a su llegada, por lo que el costo total de la solución aumenta, ya que se debe construir una subestación para poder transformar los niveles de voltaje. De aquí se hace evidente la necesidad de un transformador de potencia, así como del sistema de control y protección de la subestación. Y todos estos gastos suman valor al costo real de la electrificación de las zonas rurales.

Con la referencia del costo de construcción de tramos de línea, se plantean algunos segmentos de línea teóricos para construcción de líneas e instalaciones para abastecer de energía algunos puntos del Municipio de San Pedro Carchá.

Para estimar el requerimiento técnico-económico para ampliar una línea de transmisión de 69 KV en el municipio de San Pedro Carchá se toma de referencia la distancia medida desde la cabecera municipal de San Pedro Carchá y Gesajal, como se muestra en la figura 20. Con ayuda de la herramienta web Google Earth se adquiere el valor estimado de la distancia que hay entre San Pedro Carchá y el poblado de Sesajal. Como se muestra en la figura 20, este corresponde a 29.68 Km.

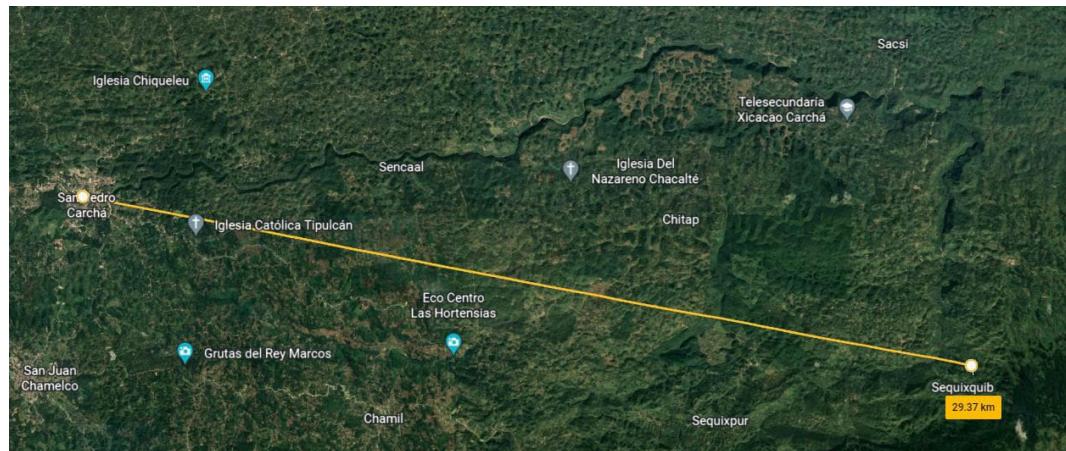
Figura 20. Distancia en línea recta desde la cabecera municipal de San Pedro Carchá y Sesajal



Fuente: Google Earth Pro (2022). Consultado el 12 de agosto de 2022. Recuperado de Lansat/Copernicus 2020 INEGI.

De forma similar, para estimar la distancia entre el municipio de San Pedro Carchá y Sequixquib se toma el valor aproximado de 29.37km, como se muestra en la figura 21.

Figura 21. Distancia en línea recta desde la cabecera municipal de San Pedro Carchá y Sequixquib



Fuente: Google Earth Pro (2022). Consultado el 12 de agosto de 2022. Recuperado de Lansat/Copernicus 2020 INEGI.

3.4. Técnicas de análisis de la información

Para la evaluación de los costos de mantenimiento implementación y mantenimiento de la microrred, se usó un análisis univariado con herramientas estadísticas descriptiva:

- Histograma

El histograma se utilizó para mostrar el costo de implementación y mantenimiento de la microrred, para un período de 30 años. Se puede observar el costo anual proyectado. La información prevista para el histograma fue la desarrollada para los costos de implementación y mantenimiento de la microrred.

Por otro lado, se hizo uso de tablas descriptivas para concentrar los datos recolectados del costo de implementación de la microrred, y los costos de construcción de los tramos de línea entre San Pedro Carchá y Sesajal, y San Pedro Carchá con Sequixquib.

Para los datos e indicadores de la población se usó la información recibida de la oficina de Unidad de Información Pública San Pedro Carchá (2021), así como información oficial encontrada del Instituto Nacional de Estadística INE.

Para tomar el contexto de la población se usaron datos oficiales tomados de Instituto Nacional de Estadística (2015) y Instituto de Investigación y Proyección sobre Ambiente Natural y Sociedad, (2017), debido a que estos son ya resultados y datos oficiales, se usan de referencia de forma directa en el estudio, pero para futuros investigadores que deseen ampliar la información en el tema, se recomienda recolectar información actualizada, del estado socio-económico de la población de San Pedro Carchá, pero este estudio excede el alcance de esta investigación.

Para las variables del estudio que son numéricas se puede tomar un enfoque económico. El análisis económico se limitó a una proyección del estado de gastos del proyecto durante un período de 30 años. Y la relación de costos que puede tener la construcción de nuevas líneas de transmisión, de acuerdo con gastos incurridos en el pasado, para la construcción de otros tramos de línea.

Con esta información se realiza una comparación directa de gastos entre los dos proyectos, que, aunque no son proyectos del mismo tipo, nos da una diferencia clara entre el costo de implementación. Además, se buscó el valor mínimo requerido por cada casa de forma mensual para que la microrred sea sostenible.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Modelo de microrred

Después de tener a la vista los materiales requeridos para la instalación de las microrredes, así como el modelo propuesto de las mismas; el cual contiene elementos convencionales y comerciales) se considera que técnicamente no hay limitación para la implementación de estas en zonas rurales.

Se muestra en la figura 22 el modelo de microrred propuesto para implementar en áreas rurales.

Este modelo tiene una generación distribuida y un sistema de almacenamiento distribuido. Se prevé el uso de conductores calibre 12 AWG, ya que el tamaño previsto de las cargas es de entre 392 W y 544 W, lo que corresponde a un consumo energético mensual de entre 71.01 kWh y 97.47 kWh. La carga estimada de las casas que forman parte de la Microrred analizada se muestra en la tabla X.

Tabla X. Consumo de potencia y energía previsto en la microrred

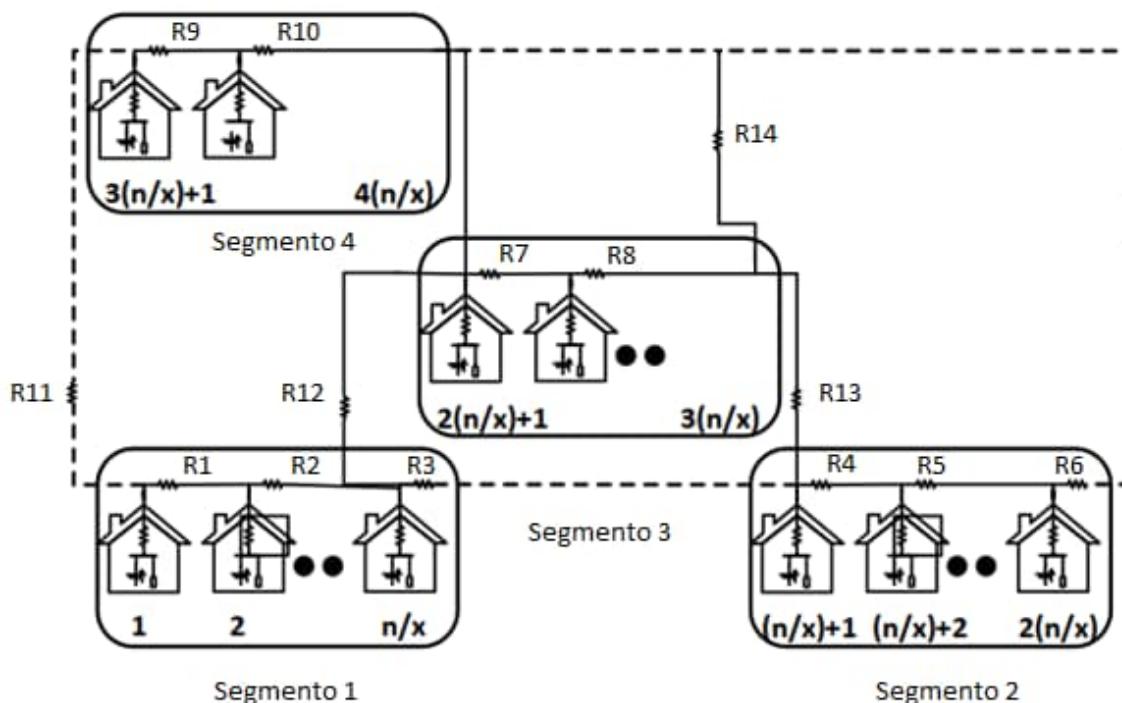
Carga por vivienda	Potencia	Energía
Viviendas con carga media	544 W	97.47 kWh/Mes
Viviendas con carga baja	392 W	71.01 kWh/Mes
Carga de la microrred	4832 W	868.86 kWh/Mes

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

La generación prevista para cada casa es de 1000 W, para poder suprir la carga de las viviendas con generación y las viviendas sin generación.

Se prevé que en cada casa exista un sistema de almacenamiento, con 10 baterías de 12 V, para poder armar un arreglo de 120 V.

Figura 22. **Modelo propuesto de microrred, para implementar en áreas rurales, este tiene generación distribuida, y un sistema de almacenamiento distribuido**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

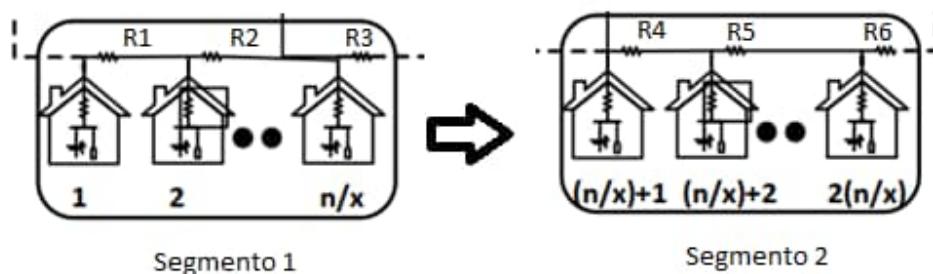
4.2. Beneficios a corto/mediano plazo de implementar microrredes en áreas rurales en Guatemala

Tomando en cuenta lo expuesto por Nasir *et. al.* (2020), dentro de las ventajas y beneficios que pueden ser obtenidos de la instalación de las microrredes tenemos:

- Bajo costo de implementación, en especial comparándolo con la construcción de una nueva línea de transmisión y demás construcciones asociadas.
- Disponibilidad de materiales para la implementación. La mayoría de los materiales es posible encontrarlos con proveedores locales. Los costos de los paneles solares y bancos de baterías han bajado considerablemente en los últimos años.
- Desde el punto de vista económico se observa que el gasto puede ser distribuido entre los pobladores / comunidades. Ya que cada instalación se hará en las instalaciones de estos. Lastimosamente para este punto influye mucho el estado de pobreza de las comunidades de San Pedro Carchá.
- Instalación simple; la instalación es similar a la de una instalación residencial, por lo que no se tiene complejidad adicional. Incluso los paneles solares ya son bastante comunes en Guatemala. En este caso la complejidad puede ser la instalación en una vivienda cuya infraestructura no pueda adaptarse o soportar la instalación de los paneles, por lo que se tendría que construir un soporte específico para estos.

- Escalabilidad del sistema: el sistema puede ser ampliado para crecer, según cambien las necesidades de los poblados, o según mejoren las condiciones económicas, así como los aportes externos.
- La implementación puede ser modular, como se muestra en la figura 23 por lo que se puede iniciar con una o dos casas o un par de poblados según el capital que se pretenda utilizar, o en regiones separadas, pero esto nos da la base para que la microrred continúe creciendo y posteriormente se incorporen más redes al sistema.

Figura 23. Ampliación modular de la microrred



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

- Reducción de pérdidas. Al ser un sistema DC, y estar las fuentes de generación relativamente cerca, se tienen bajas pérdidas en los conductores, y se evitan las pérdidas asociadas a los sistemas de transmisión y transformación. Aunque sí existen las pérdidas asociadas a los inversores y a los sistemas de gestión de baterías.
- Permite un flujo bidireccional de potencia, esto mejora el comportamiento y confiabilidad de la microrred, ya que permite suministrar energía a las

cargas de cada casa, y dependiendo la potencia requerida, también permiten suministrar potencia a la microrred.

- El acceso a la electricidad brinda opciones para las actividades productivas, la electricidad da la oportunidad a la población de realizar diferentes actividades laborales que puedan ser un ingreso económico adicional.
- Opciones para el acceso a la información y opción del uso de herramientas para el estudio y aprendizaje.
- El acceso a la energía debe reducir el tiempo dedicado en tareas domésticas, y este tiempo puede ser usado en actividades de otro tipo; idealmente actividades productivas o educativas.
- Otro beneficio es que se tiene un impacto ambiental mucho menor al de la construcción de la línea de transmisión de 69 KV. Al tener un menor impacto ambiental debería haber menor oposición social.

4.3. Costos asociados a la implementación de microrredes en áreas rurales en Guatemala

Se detallan los elementos que conformarán la microrred y con los datos obtenidos se obtiene la siguiente el costo de los elementos se obtuvo haciendo consultas y cotizaciones a diferentes proveedores del país, esto se muestra en la tabla XI.

Tabla XI. Costo para la implementación de la microrred

Item	Descripción	Cantidad (por casa)	Total (10 casas)	Precio unitario (Q)	Precio Total (Q)
1	Unidad de generación (panel)	4	24	650.00	15600.00
2	Batería	10	100	130.00	13000.00
3	Conductores	15	210	4.45	934.50
4	Conductores entre casas	100	1600	4.45	7120.00
5	Plafoneras	4	32	10.00	320.00
6	Tomas	3	30	155.00	4650.00
7	Interruptor para luminarias	2	20	30.00	600.00
8	Inversores	1	10	585.00	5850.00
9	Iluminación	4	32	14.00	448.00
10	Interruptores AC	3	30	50.00	1500.00
11	Interruptores DC	2	20	130.00	2600.00
12	Ducto eléctrico	100 m	905	28.00	25340.00
13	Tablero para Breaker de 8 circuitos	1	10	400.00	4000.00
14	Infraestructura para baterías	1	10	1500.00	15000.00
15	Infraestructura para Paneles	1	10	1500.00	15000.00
Total			5190.90		111,962.50

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Con los costos de implementación de la microrred, se considera además una proyección de los costos asociados al mantenimiento de esta, estos se proyectan a un período de 30 años, que es un dato común de vida útil de los paneles solares. La proyección de los costos de mantenimiento se muestra en la tabla XII.

Con esta información se puede obtener el costo estimado de la implementación y mantenimiento del sistema en un período de 30 años. Estos costos se muestran en la tabla XII. Ahora, la metodología de pago, o el modelo económico para la operación de la red es recomendable que se analice en un estudio independiente, ya que debe profundizar más en la temática social, y con la metodología estatal para la inversión en este tipo de proyectos. El punto que, sí es claro, es que es una forma más práctica de poder llevar energía a las poblaciones rurales, y es una forma más barata, sabiendo que, para conectar las comunidades a la red, primero deben conectarse las cargas, y la construcción de esta infraestructura es más cara, tiene un alto impacto ambiental y actualmente tiene una desaprobación social.

Tabla XII. Costo de mantenimiento de la microrred, período de 30 años

Año	Costo inicial	Limpieza e inspección semestral	Reemplazo de inversor	Reemplazo de baterías	Revisión y monitoreo técnico	Total (Q)
0	Q. 111,962.50	Q. 12,000.00			Q. 10,000.00	Q. 133,962.50
1		Q. 12,000.00				Q. 12,000.00
2		Q. 12,000.00				Q. 12,000.00
3		Q. 12,000.00			Q. 10,000.00	Q. 22,000.00
4		Q. 12,000.00				Q. 12,000.00
5		Q. 12,000.00				Q. 12,000.00
6		Q. 12,000.00			Q. 10,000.00	Q. 22,000.00
7		Q. 12,000.00				Q. 12,000.00
8		Q. 12,000.00				Q. 12,000.00
9		Q. 12,000.00		Q. 13,000.00	Q. 10,000.00	Q. 35,000.00
10		Q. 12,000.00				Q. 12,000.00
11		Q. 12,000.00				Q. 12,000.00
12		Q. 12,000.00			Q. 10,000.00	Q. 22,000.00
13		Q. 12,000.00				Q. 12,000.00
14		Q. 12,000.00	Q. 5,850.00			Q. 17,850.00
15		Q. 12,000.00			Q. 10,000.00	Q. 22,000.00
16		Q. 12,000.00				Q. 12,000.00

Continuación tabla XII.

17	Q. 12,000.00		Q. 12,000.00
18	Q. 12,000.00	Q. 10,000.00	Q. 22,000.00
19	Q. 12,000.00	Q. 13,000.00	Q. 25,000.00
20	Q. 12,000.00		Q. 12,000.00
21	Q. 12,000.00	Q. 10,000.00	Q. 22,000.00
22	Q. 12,000.00		Q. 12,000.00
23	Q. 12,000.00		Q. 12,000.00
24	Q. 12,000.00	Q. 10,000.00	Q. 22,000.00
25	Q. 12,000.00		Q. 12,000.00
26	Q. 12,000.00		Q. 12,000.00
27	Q. 12,000.00	Q. 10,000.00	Q. 22,000.00
28	Q. 12,000.00		Q. 12,000.00
29	Q. 12,000.00		Q. 12,000.00
30	Q. 30,000.00	Q. 5,850.00	Q. 35,850.00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Figura 24. **Costo de implementación y mantenimiento de la microrred**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

4.4. Viabilidad de incorporación de una microrred al Mercado Mayorista Guatemalteco

Tomando de referencia los costos para la implementación de las líneas de transmisión en 69 KV descritos por Instituto Nacional de Electrificación, (2013) encontramos que el costo de construcción de línea por km se encuentra entre los siguientes dos valores:

- Q. 424,382.40 por km
- Q. 728,738.40 por km

Tomando en cuenta la distancia aproximada requerida para una línea de transmisión entre San Pedro Carchá y Sesajal, que es de 29.68 km, y entre San Pedro Carchá y sequixquib es de 29.37 km, se estima el costo de construir una línea de transmisión para electrificar las dos regiones antes mencionadas; Sesajal y sequixquib.

- Para el caso de la línea San Pedro Carchá – Sesajal: Q. 12,595,669.63, Q. 19,097,443.79
- Para el caso de la línea San Pedro Carchá - Sequixquib: Q. 12,464,111.09, Q. 21,403,046.81

Siempre tomando en cuenta las premisas mencionadas previamente. Se muestra en la tabla XIII la comparación de las distancias y costos de construcción de las líneas construidas por el INDE, y el valor equivalente considerado para las líneas San Pedro Carchá – Sequixquib y San Pedro Carchá – Sesajal.

**Tabla XIII. Costo estimado para la construcción de líneas de transmisión
en el Municipio de San Pedro Carchá**

Descripción	Longitud km	Precio (Q)
L. T. 69 Kv. Sacapulas – Chicamán	45	Q19,097,443.79
L. T. Libertad 1 - Libertad 2.	70	Q51,011,938.77
L. T. San Pedro Carchá - Sesajal	29.68	Q21,628,955.71
L. T. San Pedro Carchá - Sequixquib	29.37	Q21,403,046.81

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Modelo propuesto de microrred

Para la elección del modelo propuesto de la microrred, se tuvieron algunas consideraciones técnicas, y económicas para el modelo que mejor se adaptaría para la electrificación de zonas aisladas. Se tomaron en cuenta las características que vuelven más eficiente a la microrred, considerando que los poblados donde se propone la instalación se encuentran en estado de pobreza y extrema pobreza.

Dentro de las consideraciones técnicas se tomaron en cuenta los siguientes puntos.

- Generación distribuida. Se opta por el uso de generación solar distribuida, considerando que el potencial solar en Guatemala es considerablemente bueno, Ministerio de Energía y Minas (2018), también teniendo en cuenta que los precios de la energía solar han tenido una tendencia a la baja desde hace varios años, y que por la topografía del terreno donde se propone el proyecto, es más adecuada una instalación distribuida.
- Almacenamiento de energía distribuido. Se selecciona un sistema de almacenamiento distribuido debido a los beneficios técnicos presentados por Nasir *et. al.* (2017). Esto hace que el sistema sea más eficiente y tenga menos pérdidas, y evita la necesidad de un lugar grande para la instalación del sistema de almacenamiento centralizado.
- Distribución de energía con corriente directa: se elige que la distribución de la energía sea en DC, de acuerdo con lo expuesto por Nasir *et. al.*

(2017). Esto nos permite tener una regulación de los consumos de corriente por medio de los sistemas de gestión, y hace que el sistema tenga una alta eficiencia.

- Como parte del sistema se contempla el uso de conductores calibre 12 AWG, media vez las distancias de entre cargas y fuentes sea menor a 250 m. Se propone que la microrred tenga un nivel de tensión de 125 VCD, ya que de acuerdo con Nasir et. al. (2017) este nivel de tensión nos da una eficiencia mayor, entre 92.66 % y 95.18 %.
- Desde el punto de vista económico; la implementación del modelo de generación y almacenamiento distribuidos nos permite que el sistema sea modular y escalable, y esto es muy importante en una solución con la que se tiene un presupuesto limitado, ya que permite que el sistema crezca según la disponibilidad de capital, o según las necesidades de la comunidad.

5.2. Beneficios a corto/mediano plazo de implementar microrredes en áreas rurales en Guatemala

Considerando la modularidad de las microrredes, es posible iniciar proyectos relativamente pequeños, al inicio, y posteriormente ir expandiendo las redes en etapas posteriores, agregando casas y/o comunidades a la microrred. Esto permite que las comunidades vayan incorporando las microrredes de forma gradual, conforme tienen la necesidad, o tienen capacidad para la inversión.

Otro beneficio es que se tiene un impacto ambiental mucho menor al de la construcción de la línea de transmisión de 69 KV. Al tener un menor impacto ambiental consecuentemente debería haber menor oposición social, aunque el

tema social es recomendable abordarlo de forma separada, ya que por lo amplio y complejo se recomienda abarcarlo en una investigación diferente y realizar un estudio formal al respecto, ya que históricamente esta región se ha caracterizado por una alta conflictividad social, y oposición a los proyectos energéticos.

Gracias a la modularidad de la implementación, es posible iniciar proyectos relativamente pequeños, y posteriormente ir agregando etapas, casas y/o comunidades. Esto permite que las comunidades vayan incorporando las microrredes de forma gradual, conforme tienen la necesidad, o según los cambios en la capacidad para la inversión.

Desde el punto de vista social, se espera que la comunidad donde se implemente tenga un desarrollo humano mayor, los habitantes tendrían más tiempo para actividades remuneradas, y ocuparían menos tiempo para actividades repetitivas, o de casa. Esto les da la oportunidad de elección de tareas a ocupar en su tiempo libre, y les permite tener más tiempo disponible para actividades productivas y educativas.

Esto de acuerdo con en Duvall (2019), el acceso a la electricidad permitirá qué las personas tengan más tiempo para elegir a que actividades dedican el tiempo libre que quedará al aprovechar la electricidad para facilitar actividades domésticas. Por otro lado, el acceso a la electricidad debe permitir el acceso a la información, aunque siempre entra en juego la opción de las personas a elegir en qué usarán su tiempo y recursos. Pero en este momento estas comunidades no tienen aún posibilidad de elegir, sino que se deben enfocar sus esfuerzos y recursos en cubrir sus necesidades básicas.

5.3. Costos asociados a la implementación de microrredes en áreas rurales en Guatemala

Tomando en cuenta los elementos necesarios para la implementación de la microrred, así como los costos asociados a las tareas de mantenimiento, se encuentra que

- Desde el punto de vista económico vemos que el costo es de implementación de la microrred es de Q. 111,962.5, lo que para un período de 30 años se puede traducir en un costo anual de Q. 3,732.00 por el poblado completo, lo cual se puede traducir en un costo por cada casa que recibe energía del sistema de aproximadamente Q. 373.20 para la implementación.
- Para el mantenimiento se prevé un costo anual variable, de acuerdo con la figura 24. Este costo es para mantener en condiciones óptimas la microrred, y vemos que es de en promedio Q. 16,201.00 anuales.
- Lastimosamente, y según los datos analizados del Instituto Nacional de Estadística (2015) y Instituto de Investigación y Proyección sobre Ambiente Natural y Sociedad (2017); la población de la zona se encuentra en un estado de pobreza y pobreza extrema, por lo que costear un sistema para la población local, no es económicamente viable, para realizarse con inversión privada, a pesar de que los costos proyectados mensualmente son accesibles para poblaciones que no se encuentran en estado de pobreza. La principal dificultad en este caso es el nivel de pobreza; ya que usar los ingresos de las personas para costear la microrred competiría directamente con el uso para cubrir sus necesidades básicas, y como se ha visto de algunos estudios como el de Duvall (2019); al tener la persona

que decidir entre sus necesidades básicas y el acceso a la energía eléctrica, siempre decidirá a favor de sus necesidades básicas, ya que son las que requiere para sobrevivir.

- La opción económicamente viable es que una empresa, o una municipalidad se haga cargo del proyecto, pero involucrando de forma directa a las personas que viven dentro de esta comunidad, esto debido a que pueden ahorrar costos en la operación y mantenimiento, y vemos que para una de estas entidades un monto de Q. 111,962.5 es más accesible. Y se puede aprovechar la operación y mantenimiento con personal de la comunidad, esto además de volverlo más viable, les daría trabajo a algunas personas de la comunidad.

De estas premisas se concluye que es viable la implementación de la microrred en áreas rurales. El detalle que tomar en cuenta es el modelo económico, ya que la inversión debe ser inicialmente absorbida por una institución, que idealmente sería el estado, y que a largo plazo puede ya ser sostenible por la misma comunidad o por una empresa privada. Se observa además que el proyecto tiene un valor mucho menor a las implementaciones necesarias para la electrificación rural por medio de la conexión al sistema nacional interconectado, de acuerdo con la tabla XIII.

Como se mencionó anteriormente, para la operación y mantenimiento, la opción más viable es que se involucre lo más posible o incluso que se deje a cargo a la misma comunidad para que mantengan en operación el sistema, y puedan encargarse de los mantenimientos. De esta idea surgen ciertas necesidades, como lo es una capacitación adecuada para la operación y el mantenimiento del sistema, así como el desarrollo de un plan de mantenimiento. Por el momento no se consideran los costos para divulgación de información y

capacitaciones, tampoco se considera el desarrollo de un plan de operación y mantenimiento ya que excede el alcance de este trabajo, pero para que el proyecto se mantenga en el largo plazo, la capacitación de la comunidad será uno de los puntos clave. Así como se mencionó en el apartado 2.4.3. y de acuerdo con lo que propone Núñez, (2013), la comunidad es un factor crítico en el logro de la supervisión y mantenimiento a bajo costo, lo que ayuda a incrementar la sustentabilidad en el largo plazo, por medio de un aumento de la resiliencia del sistema.

Se hace evidente que no se debe priorizar la viabilidad económica en la comparación de los proyectos relacionados con la electrificación rural, esto debido al alto costo de la inversión que cualquiera de los proyectos implica. La implementación de la microrred difícilmente podrá ser cubierto por personas individuales, y mucho menos por poblaciones con altos índices de pobreza.

5.4. Viabilidad de incorporación de una microrred al Mercado Mayorista Guatemalteco

Considerando los resultados mostrados en la tabla XIII, vemos que, por el bajo nivel de electrificación en algunas zonas, no es viable la construcción de líneas de transmisión para la electrificación de zonas aisladas. Por esta razón tampoco es viable a corto y probablemente tampoco a mediano plazo la incorporación de la microrred al mercado mayorista. Es necesario primero tener la conexión al sistema nacional interconectado, para poder considerar las opciones con las que podría participar la microrred en el mercado mayorista.

Se hace evidente también que aún no se puede comparar la ejecución y desarrollo de ambos proyectos, ya que, para el caso de las microrredes, puede ser un micro-proyecto o proyecto pequeños, ser modular y con una alta

escalabilidad, mientras que la electrificación por medio de una ampliación de la red es un proyecto grande, más caro, y con muchas aristas, como la ambiental y social, lo cual complica su ejecución. Por estas razones, en zonas rurales con poca electrificación, aún no tiene sentido analizar cómo cambia el proyecto con la conexión al sistema nacional, ya que por el momento no es viable económicamente considerar la construcción de líneas, subestaciones o instalación de transformadores para poder alimentar la demanda actual.

Otro factor importante por tomar en cuenta, pero que afecta a ambos tipos de proyecto es que la población de la zona vive en condiciones de pobreza o extrema pobreza, por lo que inicialmente no se puede considerar que se costee, o impulse el proyecto con apoyo de la comunidad, sino que el proyecto tiene que ser un proyecto realizado por una entidad estatal, y posteriormente puede volverse sostenible con la participación de la comunidad en la operación y el mantenimiento.

CONCLUSIONES

1. La implementación de una microrred trae ventajas técnicas, debido a sus características constructivas y operativas, lo cual reduce el costo de implementación comparado a los proyectos tradicionales de electrificación rural, lo que a su vez vuelve a las microrredes una buena alternativa la implementación con el objetivo de mejorar el porcentaje de electrificación rural en Guatemala.
2. Existen beneficios técnicos, sociales, económicos y ambientales al implementar el uso de microrredes para la electrificación rural en lugar de la construcción de líneas de transmisión.
3. El costo asociado a la implementación de microrredes es relativamente bajo, comparado con la construcción de segmentos nuevos de líneas de transmisión, ya que estas además requieren la construcción de subestaciones nuevas, preparación de terrenos, servidumbres, obra civil, entre otras actividades, y las microrredes nos dan versatilidad para su implementación, crecimiento y modificación. A pesar de esto, no se debe priorizar la viabilidad económica, para la implementación de proyectos enfocados en la electrificación rural, ya que, por la magnitud de los proyectos de electrificación, será difícil que se logre la viabilidad económica, en especial para las zonas con altos índices de pobreza en el país.

4. Por el bajo nivel de electrificación que existe en algunos municipios de Guatemala, no es viable la construcción de líneas de transmisión para la electrificación de estas zonas aisladas, por esta razón tampoco es viable a corto y probablemente tampoco a mediano plazo la incorporación al mercado mayorista de las microrredes usadas para electrificación rural.

RECOMENDACIONES

1. Considerar por parte del Instituto nacional de electrificación INDE; alternativas para la electrificación nacional, ya que se evidencia que la inversión para la electrificación puede usarse de mejor forma, considerando las características geográficas del país y la conflictividad social a ciertos proyectos, por lo que se deberían considerar otras alternativas, como, las microrredes.
2. Abordar el tema de electrificación rural, desde un enfoque orientado al desarrollo humano y bienestar social, ya que uno de los grandes desafíos de la implementación de microrredes es el estado social-económico de las poblaciones en áreas rurales, pero por lo amplio y complejo de este tema, los investigadores deben cambiar el enfoque, ya que uno socio-económico se ve limitado por la condición de pobreza y extrema pobreza en la que viven la mayoría de los poblados rurales en Guatemala, no parece haber a corto y mediano plazo un modelo económica que sea capaz de soportar esta inversión, probablemente sólo es posible a largo plazo, ya que no se percibirá el retorno de la inversión.
3. Ampliar el estudio en temas de continuidad y confiabilidad del servicio, a los futuros estudiantes de la Escuela de Estudios de Postgrado, se les sugiere tomar de referencia que el modelo del sistema propuesto es muy diferente a un sistema de distribución convencional, y es recomendable un análisis para definir el comportamiento del sistema ante contingencias y fallas.

4. Abordar y ampliar el estudio técnico con el uso de fuentes de generación hídrica para regiones con este potencial, pero teniendo en cuenta que la conflictividad social puede ser una limitante que debe ser considerada. Esto puede ser de interés para los futuros estudiantes de la Escuela de Estudios de Postgrado.
5. Promover investigaciones que analicen cómo se relaciona el acceso a la electricidad con el desarrollo de las personas y comunidades, teniendo en cuenta que, actividades socioeconómicas como el trabajo y la educación, se facilitan con herramientas que dependen de la electricidad. A las unidades de investigación del área social de la Universidad de San Carlos de Guatemala; se les recomienda promover este tipo de investigaciones.
6. Estudiar la forma de financiación de una microrred a la Comisión Nacional de Energía Eléctrica se le sugiere un estudio para determinar la forma o formas de financiación para microrred en áreas rurales. A pesar de que los costos de implementación son más bajos que los de la conexión al sistema nacional interconectado, las líneas de transmisión reciben su remuneración por medio del peaje, mientras que la microrred tendría que finanziarse directamente de la generación que produce.

REFERENCIAS

1. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2012). *Informe de análisis de consumo de electricidad*. Guatemala: Autor.
2. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2014). *Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoproductores con excedentes de energía*. Guatemala: Autor.
3. Corsair, H. J. (2013). *Causes of success and failure of stand-alone solar electric systems in rural guatemala*. Estados Unidos: Johns Hopkins University. Recuperado de <https://jsscholarship.library.jhu.edu/handle/1774.2/36952>.
4. Decreto 52-2003. Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable. Diario de Centroamérica. Guatemala. 10 de Noviembre de 2003.
5. Duvall, K. (2019). *Access is not enough impacts of electrification on women's time use in Guatemala and El Salvador*. Estados Unidos: Oregon State University. Recuperado de <https://ir.library.oregonstate.edu/downloads/fx719t736>.
6. Gandini, D. (octubre, 2017). Direct current microgrids based on solar power systems and storage optimization, as a tool for cost- -effective rural electrification. *Renewable Energy*, 111, 1-32.

7. Gobierno de Guatemala. (2017). *Plan Nacional de Energía 2017-2032*. Guatemala: Autor.
8. Instituto de Investigación y Proyección sobre Ambiente Natural y Sociedad. (2017). *Índice socioecológico del municipio, Municipio de San Pedro Carchá*. Guatemala: Universidad Rafael Landivar.
9. Instituto Nacional de Electrificación. (2010). *Ley Organica del Instituto Nacional de Electrificación INDE*. Guatemala: Autor.
10. Instituto Nacional de Electrificación. (2013). *Construcción línea de transmisión 69KV*. Guatemala: Autor.
11. Instituto Nacional de Estadística Guatemala (2014). *San Pedro Carchá*. Guatemala: Autor.
12. Instituto Nacional de Estadística. (2015). *Estimaciones y proyecciones municipales 2015-2035. Población total. Alta Verapaz*. Guatemala: Autor.
13. Jiménez, D., Vives, M., Jiménez, G., y Mendoza, P. (diciembre, 2017). Development of a Methodology for Planning and Design of Microgrids for Rural Electrification. *IEEE*, 1, 1-6.
14. Khan, R., Schultz, N., y Nasir, M. (2019). *Distribution Loss Analysis of DC Microgrids for Rural Electrification*. Estados Unidos: IEEE.
15. Khodayar, M. (mayo, 2017). Rural electrification and expansion planning of off-grid microgrids. *Electricity Journals*, 30(4), 68-74.

16. Matsumoto, Y. (2010). *Celdas solares de silicio: Fundamento y tendencia*. México: Autor.
17. Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Energía solar en Guatemala*. Guatemala: Autor.
18. Ministerio de Energía y Minas. (2019). *Plan indicativo de Electrificación Rural*. Guatemala: Autor.
19. Ministerio de Energía y Minas. (2020). *Política de electrificación Rural 2020-2050*. Guatemala: Autor.
20. Nasir, M., Iqbal, S., Khan, H., Vasquez, J., y Guerrero, J. (noviembre, 2020). Sustainable rural electrification through solar PV DC microgrids—An architecture-based assessment. *MDPI Journals*, 8(11), 1-20.
21. Nasir, M., Khan, H. A., Hussain, A., Mateen, L., y Ahmad, N. (agosto, 2017). Solar PV-based scalable DC microgrid for rural electrification in developing regions. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(1), 1-9.
22. Núñez, O. (septiembre, 2013). Microrredes en la red eléctrica del Futuro - Caso Huatacondo. *Ciencia y Tecnología*, 29(2), 1-16.
23. Rosas, M. L. (2014). *Convertidor CD/CA sin aislamiento con conexión a la red eléctrica para aplicaciones en paneles solares*. México: Instituto Potosino de Investigación científica y Tecnológica.

Recuperado de
[https://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/2851.](https://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/2851)

24. Santillán, A. (2016). *Estudio de la incorporación de baterías en sistemas fotovoltaicos*. Barcelona, España: Universitat de Barcelona. Recuperado de https://deposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/101966/1/TFM_MER_SE_Alberto%20Santill%C3%A1n.pdf.
25. Ubilla, K., Jiménez, G., Hernández, R., y Reyes, L. (octubre, 2014). Smart microgrids as a solution for rural electrification: Ensuring long-term sustainability through cadastre and business models. *IEEE Transactions On Sustainable Energy*, 5(4), 1-9.
26. Unidad de Información Pública San Pedro Carchá. (2021). *Resolución UIP Número 938-2021*. Alta Verapaz, Guatemala: Municipalidad de San Pedro Carchá.
27. Williams, N., Jaramillo, P., Taneja, J., y Ustun, T. (diciembre, 2015). Enabling private sector investment in microgrid-based rural electrification in developing countries: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1-14.